



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16686-TDI/1630

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ESTUDOS DE PRECIPITAÇÃO USANDO RADARES E SATÉLITES

João Victor Cal Garcia

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Stephan Stephany, e Augusto Brandão d'Oliveira, aprovada
em 25 de fevereiro de 2010.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.22.20.10>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16686-TDI/1630

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ESTUDOS DE PRECIPITAÇÃO USANDO RADARES E SATÉLITES

João Victor Cal Garcia

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Stephan Stephany, e Augusto Brandão d'Oliveira, aprovada
em 25 de fevereiro de 2010.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.22.20.10>>

INPE
São José dos Campos
2010

Garcia, João Victor Cal.

G165d Desenvolvimento de software para estudos de precipitação usando radares e satélites / João Victor Cal Garcia. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xx + 80 p. ; (INPE-16686-TDI/1630)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Stephan Stephany, e Augusto Brandão d'Oliveira.

1. Radares meteorológicos. 2. Satélites meteorológicos. 3. C++ (Linguagem de programação). 4. Processamento de imagens. 5. Agrupamento. I. Título.

CDU 004.421.2:519.17

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dra. Margarete Oliveira Domingues



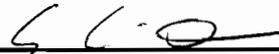
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Stephan Stephany



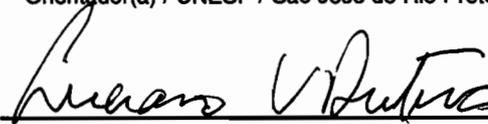
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Augusto Brandão de Oliveira



Orientador(a) / UNESP / São José do Rio Preto - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Roberto Vicente Calheiros



Convidado(a) / UNESP / Bauru - SP

Aluno (a): João Victor Cal Garcia

São José dos Campos, 25 de fevereiro de 2010

A minha família.

AGRADECIMENTOS

A minha família e meus amigos, por todo o apoio moral e material, sem os quais este trabalho não teria sido possível em primeiro lugar.

Aos meus orientadores, Dr. Augusto Brandão d'Oliveira e Dr. Stephan Stephany, por terem me apontado o rumo toda vez que encontrei obstáculos.

Ao Dr. Roberto Vicente Calheiros por todo o apoio.

Ao IPMet, por ter cedido os dados necessários para o trabalho.

A todo o pessoal do INPE, que sempre me ajudou quando estava perdido.

À CAPES, por ter financiado este trabalho.

Ao Steve Jackson, Dave Arneson, Gary Gigax, Steve Kenson e aos outros que me ajudaram a descarregar o stress e manter a saúde mental.

RESUMO

A análise conjunta de imagens de radar e satélite meteorológico é realizada para correlacionar as estruturas das precipitações observadas por ambos os instrumentos. O estudo de tais correlações permite estender o alcance das leituras de radar. Atualmente, esta tarefa é realizada manualmente, de forma não sistemática, por meio do uso de vários programas de computador. Este trabalho apresenta o *software Radar-Satellite Image Analysis System* (RSIAS), que automatiza parcialmente tal processo lidando com diferentes formatos de dados, projeções e sistemas de coordenadas das imagens. Esse *software* implementa uma abordagem proposta recentemente que permite correlacionar melhor as estruturas precipitantes de tais imagens a um custo de processamento semelhante. Dessa forma, pretende-se viabilizar a análise conjunta de imagens de radar e satélite para uma grande quantidade de eventos de precipitação.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR STUDIES OF PRECIPITATION USING RADARS AND SATELLITE

ABSTRACT

The joint analysis of meteorological satellite and radar images is performed in order to correlate the precipitation structures observed in both images. The study of such correlation allows the extension of the radar range. This task is currently performed by hand, in a non systematical way, making use of several computer programs. This work presents the Radar-Satellite Image Analysis System (RSIAS), a software that partially automates this process dealing with different image formats, projections and coordinate systems. This software implements a recently proposed approach that allows a better correlation of such images. Therefore, it is intended to make feasible the joint analysis of radar and satellite images for a large number of precipitation events.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Cobertura do NEXRAD em território nos EUA.	4
1.2 Localização do radar de Bauru (BRU).	5
1.3 Localização dos radares existentes no Brasil e instituições responsáveis.	5
2.1 Funcionamento do radar	14
2.2 Altura do feixe de radar	15
2.3 Efeito da atenuação no sinal de radar	16
2.4 Variação da altitude das leituras	17
2.5 Radar do IPMET de Presidente Prudente	17
2.6 Distorção do tipo olho-de-peixe com imagem normal a esquerda e distorcida a direita.	20
2.7 Ilustração do satélite NOAA-18	21
2.8 Exemplo do canal 5 do MHS	22
3.1 Ilustração comparativa da imagem de satélite (esquerda) com radar (direita)	26
3.2 Procedimento realizado	26
3.3 Imagem de satélite com coordenadas matriciais a esquerda e Latitude-Longitude a direita.	28
3.4 Posição do radar numa leitura de satélite	29
3.5 Modelo de uma imagem de radar	29
3.6 Imagem de radar a esquerda e satélite a direita, baseadas nos eixos latitude e longitude	30
3.7 Ilustração do cálculo da distância entre <i>pixels</i>	31
3.8 Associação de <i>pixels</i>	32
3.9 Ilustração do parâmetro P_1	35
4.1 Diagrama UML da classe <i>Matriz</i>	39
4.2 Diagrama UML da classe <i>filterHDF4</i>	40
4.3 Algoritmo para associação	41
4.4 Diagrama UML da classe <i>Filtro</i>	42
4.5 Algoritmo para filtragem	42
4.6 Diagrama UML da classe <i>statistics</i>	42
4.7 Algoritmo para cálculo do centro de uma imagem.	43

4.8	Composição 3D sem distorção e em alta resolução espacial.	46
4.9	a) Imagem modelo original; b) Calheiros e d'Oliveira (2007); c) Remapeamento; d) Vizinho mais Próximo; e) Bi-cúbica; f) Bi-linear	47
5.1	Tela básica do <i>software</i>	50
5.2	Imagem de radar com CAPPI original	50
5.3	Imagem de radar pós-filtragem	51
5.4	Imagem de radar final, pós-processamento	52
5.5	Imagem de satélite em tons de cinza	52
5.6	Imagem de satélite em tons de cinza invertidos	53
5.7	Imagem de satélite em dBZ	54
5.8	Composição com ambas as imagens	54
5.9	Composição com radar e satélite, com satélite após 240 km de distância do radar	55
5.10	Imagem de satélite apenas na região até 240 km do radar	56
5.11	Barra de informações	56
5.12	Posição do satélite em cada um dos eventos estudados.	58
5.13	Resultados para o Evento 1	60
5.14	Resultados para o Evento 2	61
5.15	Resultados para o Evento 3	62
5.16	Resultados para o Evento 4	63
5.17	Resultados para o Evento 5	64
5.18	Resultados para o Evento 6	66
5.19	Resultados para o Evento 7	67
5.20	Resultados para o Evento 8	68

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Trecho de um arquivo com dados CAPPI em ASCII	18
3.1 Valores das constantes para relações $T_b - Z$ estudadas	27
3.2 Valores ótimos para os parâmetros estatísticos	36
4.1 Máquinas utilizadas	44
4.2 Tempo médio de execução da filtragem	45
4.3 Resultados comparativos	46
4.4 Tempo de processamento comparativo	47
5.1 Momento de ocorrência de cada Evento	57
5.2 Resultados estatísticos para cada evento	65
5.3 Tempo de processamento	69
5.4 Resultados estatísticos para cada evento usando apenas remapeamento ponderado.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMSR-E	–	Advanced Microwave Sounding Radiometer for the Earth Observing System
AMSU	–	Advanced Microwave Sounding Unit
APT	–	Automatic Picture Transmission
ATMS	–	Advanced Technology Microwave Sounder
AVHRR	–	Advanced Very High Resolution Radiometer
CAPPI	–	Constant Altitude Plan Position Indicator
DMSP	–	Defense Meteorological Satellite Program
HIRS	–	High Resolution Infrared Radiation Sounder
HSB	–	Humidity Sounder for Brazil
IBILCE	–	Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (UNESP)
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPMet	–	Instituto de Pesquisas Meteorológicas (UNESP)
IPRIT	–	IPMet Radar Imaging Tool
IRIS	–	Interactive Radar Information System
MHS	–	Microwave Humidity Sounder
NETD	–	Noise Equivalent Temperature Difference
NEXRAD	–	Next-Generation Weather Radar
NOAA	–	National Oceanic & Atmospheric Administration
NPOESS	–	National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System
NPP	–	Preparatory Project
POES	–	Polar Operational Environmental Satellite
PPI	–	Plan Position Indicator
Radar	–	Radio Detection And Ranging
RDF	–	Radio Direction Finding
RSIAS	–	Radar-Satellite Image Analysis System
SHF	–	Super High Frequency
SIGMET	–	Significant Meteorological Information
SSM/I	–	Special Sensor Microwave Imager
SSM/T-1	–	Special Sensor Microwave Atmospheric Temperature Sounder
SSM/T-2	–	Water Vapor Profiler
SSMIS	–	Special Sensor Microwave Imager/Sounder
TMI	–	Microwave Imager
TRMM	–	Tropical Rainfall Measurement Mission
UHF	–	Ultra High Frequency
UNESP	–	Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.1.1 Radares meteorológicos	3
1.1.2 Satélites meteorológicos	4
1.2 Motivação	6
1.3 Metodologias	8
1.4 Objetivos	10
1.5 Descrição dos capítulos	11
2 DADOS E INSTRUMENTOS	13
2.1 Imagens de radar	13
2.1.1 O funcionamento do radar	13
2.1.2 Vantagens do uso	14
2.1.3 Limitações	14
2.1.4 O formato CAPPI	16
2.1.5 Radares utilizados	17
2.1.6 Dados utilizados	18
2.2 Imagens de satélite	18
2.2.1 Vantagens do uso	19
2.2.2 Principais problemas	19
2.2.3 Satélite utilizado	21
2.2.3.1 MHS	21
2.2.4 Formato dos dados	22
2.2.4.1 Descrição dos dados	23
2.2.5 Obtenção dos dados	23
2.3 Dificuldades de correlacionar imagens de sensores diferentes	23
3 TÉCNICAS E METODOLOGIA	25
3.1 Equivalência de imagens de radar e satélite	25
3.1.1 Pré-Requisitos e escopo	25
3.1.2 Descrição simplificada do procedimento	26

3.1.3	Ajustes Preliminares	26
3.1.3.1	Ajuste de unidades	27
3.1.3.2	Mudanças de coordenadas	28
3.1.4	Calculo da resolução espacial da imagem	31
3.1.5	Associação de <i>pixels</i> entre as imagens	32
3.1.6	Filtragem	32
3.1.7	Ajuste de resolução	33
3.2	Metodologia para análise dos resultados	34
3.3	Análise estatística	34
4	IMPLEMENTAÇÃO	37
4.1	Ferramentas computacionais	37
4.1.1	OPENGL	37
4.1.2	GLUT	37
4.1.3	C++	38
4.2	Leitura dos dados	38
4.3	Associação de pixels	40
4.4	Implementação do filtro	41
4.5	Parâmetros estatísticos	41
4.6	Análise de desempenho	43
4.7	Qualidade da filtragem	45
5	DEMONSTRAÇÃO E TESTES	49
5.1	Interface	49
5.1.1	Visualizações de radar	50
5.1.2	Visualizações de satélite	51
5.1.3	Visualizações conjuntas	53
5.1.4	Barra lateral	55
5.2	Testes	57
5.2.1	Resultados	57
5.2.1.1	Economia de tempo do processo semi-automatizado em relação ao processo manual	69
6	PALAVRAS FINAIS	71
6.1	Trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento e a capacidade de prever o clima são de grande interesse econômico. Muitos campos de atividade humana são beneficiados com isso, como agricultura, meios de transporte, defesa civil, logística e empresas seguradoras, apenas para citar alguns. Esse tipo de informação é mais útil quando obtida com relativa antecedência (ZHU *et al.*, 2002).

O estado da arte no estudo e previsão climática está ligado á modelos matemáticos e estatísticos complexos (AHRENS, 1988). Esses modelos necessitam de grandes quantidades dos mais diferentes tipos de dados, obtidos de maneiras variadas com instrumentos especiais, além de alguma idéia de como esses dados evoluem através do tempo.

O estudo de regiões extensas com o uso de ferramentas presenciais como pluviômetros é pouco prático e seu custo normalmente é proibitivo. No estudo específico das precipitações, satélites e radares conseguem observar grandes extensões sem sofrer dos mesmos problemas logísticos, sendo esse o grande trunfo do sensoriamento remoto.

1.1 Considerações iniciais

Para a medida da precipitação da chuva podem ser utilizados pluviômetros, radares meteorológicos e satélites artificiais. Existe uma complementaridade entre todas as técnicas. Entretanto, desses instrumentos, os radares meteorológicos e os satélites equipados com sensores especializados tem uma importância muito grande. Ambos os instrumentos são capazes de cobrir áreas que seriam de outra maneira impraticáveis por razões econômicas ou geográficas.

Várias técnicas foram desenvolvidas para estimar indiretamente precipitação usando imagens de satélite nos espectros visível e infravermelho. A maioria desses métodos é baseada nos resultados operacionais, que mostram que as regiões de chuva tendem a ser correlacionado com nuvens brilhantes e frias, além da noção de que as nuvens de convecção profunda podem produzir mais chuva. Quando imagens de satélite em infravermelho com alta resolução espacial e temporal se tornaram disponíveis, a precipitação pôde ser correlacionada com a temperatura do topo de nuvem e técnicas de satélite foram redefinidas em função disso. Uma grande quantidade de novos algoritmos de estimativa de precipitação que utilizam infravermelho como única

entrada vem sendo desenvolvidos desde então(ADLER; NEGRI, 1988; ARKIN, 1979; ARKIN; MEISNER, 1987; NEGRI et al., 1984; DONEAUD et al., 1984; LOPEZ et al., 1989; GRIFFITH et al., 1976; GRIFFITH et al., 1978; GRIFFITH et al., 1981; HSU et al., 1997; HONG et al., 2004). Uma desvantagem das técnicas de estimar precipitação utilizando espectro visual ou infravermelho é que elas são necessariamente inferenciais, ou seja, a precipitação é inferida a partir de observação de nuvens, o que torna sua exatidão difícil de ser especificada. Essas técnicas normalmente são dependentes da localização geográfica, sendo difícil sua aplicação direta para outras regiões. Em contraste, o uso de microondas no sensoriamento remoto pode fornecer informações diretas sobre a precipitação. Radiometria passiva de microondas a partir de satélite também tem potencial para estimar as taxas de precipitação, posto que a radiação microondas contém sinais diretos da micro-física da precipitação e das nuvens. No entanto, a insuficiência de cobertura espacial e temporal dos atuais sensores em órbita polar para latitudes médias, bem como a falta de satélites com sensores de microondas ativos constituem uma grande desvantagem para os estudos de chuva convectiva. Além disso, as irradiações de microondas medidas por satélites são influenciadas pelos efeitos da vegetação e solo sobre superfícies terrestres (KAMARIANAKIS et al., 2006).

Apesar das desvantagens das estimativas de precipitação inferidas por imagens de satélite no espectro infravermelho, o interesse em fazer essas estimativas não diminuiu. A razão para isto é a curta duração e alta variabilidade temporal dos eventos de precipitação e, portanto, a necessidade de alta resolução temporal nas observações. Assim, apesar da disponibilidade de técnicas mais precisas utilizando microondas, as observações geossíncronas (atualmente limitadas a comprimentos de onda do infravermelho) tornaram-se extremamente importantes. No entanto, as técnicas de sensoriamento remoto baseadas em microondas fornecem estimativas de precipitação suficientemente precisas para serem utilizados como dados de treinamento em um processo de calibração de uma técnica de satélites infravermelhos (KAMARIANAKIS et al., 2006).

Estimativas de precipitação tradicionalmente envolveram apenas bandas de frequência de microondas transparente próximo de frequências como 6, 10, 18, 23, 37 e 89 GHz, em instrumentos como o *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I) nos satélites *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), o *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM) do *Microwave Imager* (TMI), e do *Advanced Microwave*

Sounding Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) no satélite Aqua da NASA. Esses canais transparentes mostram as assinaturas de calor na presença de vapor d'água sobre um fundo de oceano reflexivo radiometricamente frio e assinaturas de dispersão na presença de partículas de gelo sobre a terra (CHEN et al., 2006).

Desde 1990, houve vários instrumentos com canais para microondas opaco com bandas de ressonância do oxigênio em 54 GHz ou o vapor de água em 183 GHz, como os instrumentos Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) dos satélites NOAA-15, NOAA-16 e NOAA-17; *Humidity Sounder for Brazil* (HSB) no satélite Aqua da NASA; *Microwave Humidity Sounder* (MHS) no satélite NOAA-18, o *Special Sensor Microwave Imager/Sounder* (SSMIS) no satélite DMSP F-16, e o *Special Sensor Microwave Atmospheric Temperature Sounder* (SSM/T-1) e *Water Vapor Profiler* (SSM/T-2) a bordo de alguns dos satélites DMSP. Com o lançamento de tais instrumentos, tem havido tentativas de utilizar os canais opacos para estimar precipitação. Staelin e Chen (2000) e Chen e Staelin (2003) desenvolveram algoritmos para estimar a precipitação usando AMSU-A/B e AMSU/HSB. Mais instrumentos com canais nas bandas 54 GHz e 183 GHz serão lançados no futuro. Alguns deles incluem a AMSU-A/MHS no NOAA-N, METOP-1, METOP-2 e METOP-3; e o *Advanced Technology Microwave Sounder* (ATMS) no *National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System* (NPOESS) *Preparatory Project* (NPP) e os satélites NPOESS. Os instrumentos adicionais e melhorias nos instrumentos provavelmente contribuirão para a melhoria dos algoritmos futuros de recuperação informações sobre precipitação (CHEN et al., 2006).

1.1.1 Radares meteorológicos

Um dos métodos de coleta de dados meteorológicos para posterior estudo e computação consiste no uso de radares. Desde 1941 (ATLAS, 1990), radares são prática comum no estudo do comportamento de nuvens de chuva e precipitações. Nos Estados Unidos, existe o *Next Generation Weather Radar* (NEXRAD), uma rede interligada com 158 radares de alta-definição operacionais (NATIONAL WEATHER SERVICE, 2007), como pode ser visto na Figura 1.1. Os dados gerados por esta rede são de domínio público, o que além do excelente material para os meteorologistas, também tem ajudado a planejar rotas aéreas, evitando regiões de turbulência (JOHNSON, 2007).

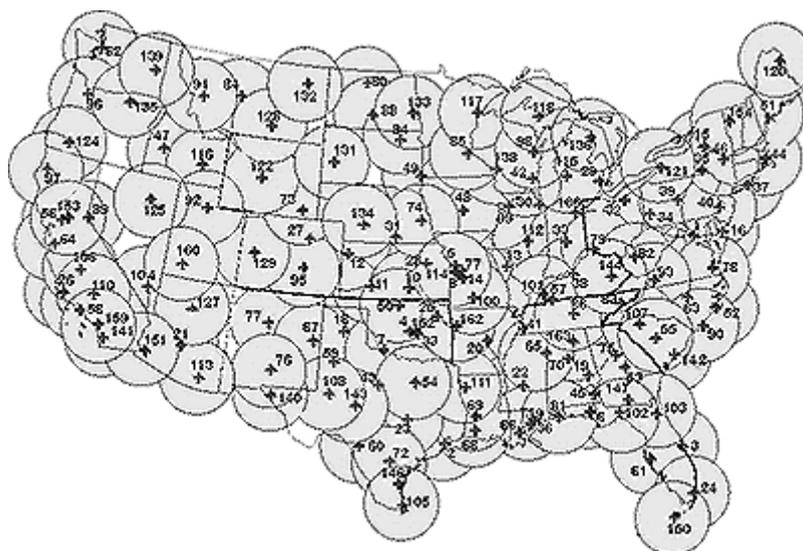


Figura 1.1 - Cobertura do NEXRAD em território nos EUA.
 Fonte: <http://www.roc.noaa.gov/maps.asp> (2010)

No Brasil, existe uma quantidade bem mais discreta de radares – cerca de 30, incluindo na contagem os radares de uso militar.

Dois dos radares mais importantes são os localizados nas cidades de Bauru e Presidente Prudente, e pertencem ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet), Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP) de Bauru. Em particular no presente trabalho as imagens de radar utilizados são provenientes deste último, identificada na Figura 1.2, onde o raio do círculo interno é 240 km (máximo alcance para produto CAPPI), raio do círculo externo é 450 km (máximo alcance para observações do radar). A área sombreada é porção entre 390–450 km mais ao leste na área de cobertura do radar.

Existem ainda radares no Sul, Norte e Nordeste brasileiro, mas seria necessário que existisse no Brasil uma rede bem maior (com um número de radares próximo ao do *NEXRAD*) e interligada para que pudesse ser feita uma cobertura adequada do território nacional, para fins de pesquisas e de monitoramento e previsão (ANGELIS et al., 2006). A Figura 1.3 apresenta um mapa com a área de cobertura aproximada dos radares que amostram o território brasileiro.

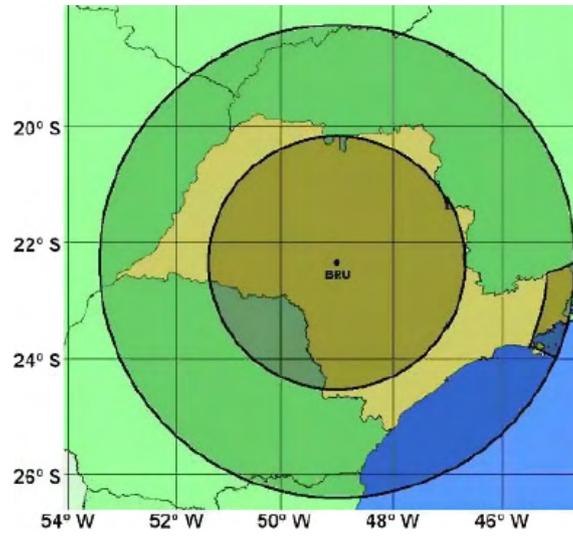


Figura 1.2 - Localização do radar de Bauru (BRU).
 Fonte: Calheiros e d'Oliveira (2007)

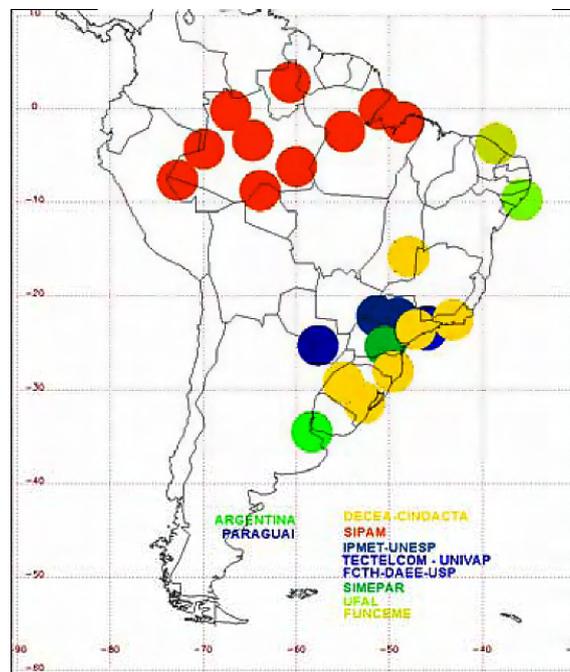


Figura 1.3 - Localização dos radares existentes no Brasil e instituições responsáveis.
 Fonte: Angelis et al. (2006)

1.1.2 Satélites meteorológicos

Os satélites são também uma ferramenta bastante utilizada na obtenção de dados sobre precipitações convectivas. Eles cobrem grandes áreas e podem amostrar regiões isoladas ou de difícil acesso para outros sensores, como oceanos ou pólos, com a mesma facilidade que pode obter dados de regiões urbanas ou já cobertas por outros instrumentos. Seu uso também é solução para o problema do monitoramento de regiões limitadas por fatores socioeconômicos, como é o caso do Brasil (Pereira Filho, 2004).

O tipo de satélite usado primariamente para monitorar o clima e tempo terrestre é conhecido por satélite meteorológico. A órbita desses equipamentos é normalmente considerada geoestacionária ou polar. Em órbitas polares, o satélite sobrevoa uma mesma faixa da superfície terrestre a cada intervalo de algumas horas, indo de polo a polo. Já em órbitas geoestacionárias, ele permanece em órbita sobre um mesmo ponto da Terra enquanto se move na mesma velocidade da rotação do planeta. O tipo de órbita tem grande influência sobre os dados, determinando as regiões que podem ser atingidas e, em conjunto com as limitações tecnológicas dos instrumentos presentes, a resolução espacial das medidas (CHUVIECO, 2008).

Esses satélites meteorológicos, no entanto, vêem mais que apenas nuvens. O tipo de informação por eles coletada inclui luzes urbanas, queimadas, efeitos da poluição, auroras, tempestades de areia ou poeira, cobertura de neve, mapeamento do gelo, limites dos oceanos, correntes marítimas, fluxos de energia, atividades vulcânicas, nuvens de cinzas e até bandos de pássaros em vôo. Outros tipos de satélite de monitoramento ambiental podem detectar mudanças na vegetação terrestre, condições oceânicas, alterações nas camadas de gelo e mesmo manchas de óleo no oceano (KELKAR, 2007).

Os dados gerados por instrumentos como o MHS presente no satélite NOAA-18 são bastante úteis para o estudo específico das precipitações. No cenário brasileiro, onde existem menos radares que o necessário para a cobertura total do território nacional, as imagens de satélite se tornam mais importantes para complementar as informações geradas por outros aparelhos (Pereira Filho et al., 2004).

1.2 Motivação

O uso de radares e satélites para obtenção de dados voltados para o estudo de precipitação convectiva é bastante disseminado, apesar da existência de limitações físicas e tecnológicas nesses instrumentos.

A variação da curvatura terrestre afeta ambos os instrumentos, distorcendo de alguma forma as imagens por eles geradas. A resolução espacial de satélite, ou seja, área que cada pixel representa numa imagem, não é constante, com os pixels mais próximos da borda da imagem representando maiores áreas amostradas, e os pixels centrais representando menores áreas. Nos radares, a altitude de cada pixel varia.

A resolução temporal e espacial também é diferente para os tipos de sensoriamento. Os satélites meteorológicos podem atingir uma área de cobertura inimaginável para radares em terra, mas, no caso das órbitas polares, amostram cada região apenas umas poucas vezes por dia, enquanto os radares podem fazê-lo várias vezes por hora. As imagens de radar meteorológico em terra possuem também resolução espacial bem maior que a dos satélites meteorológicos (CALHEIROS; D'OLIVEIRA,).

Mais uma diferença entre os sensores é a forma como observam as precipitações. Os satélites estão limitados a observar as formações das nuvens de cima, obtendo a temperatura do topo de nuvem, mas sem nenhuma idéia da composição vertical das mesmas. Os radares observam as nuvens lateralmente, e possuem uma idéia bem melhor de seus perfis, mas estão limitados a curtas distâncias, pois suas leituras ganham altitude rapidamente, devido à curvatura terrestre, e logo sua utilidade é reduzida.

O uso de radares para o estudo das precipitações já é bastante disseminado, e alguns países possuem redes desses aparelhos cobrindo todo o seu território nacional. Os dados obtidos são de grande utilidade para estudos meteorológicos, e são de grande importância para os modelos matemáticos utilizados na compreensão e previsão do tempo e do clima.

O Brasil possui uma quantidade pequena de radares meteorológicos, insuficiente para cobrir todo o território nacional. O país precisaria de uma rede com um número aproximado de radares ao do NEXRAD para que esse objetivo fosse concluído¹,

¹Cálculo feito apenas em relação à área do Brasil e a cobertura média de cada radar. Desconsiderando-se limitações topográficas ou particularidades da distribuição do território.

e os custos de cada radar, incluindo instalação, é de aproximadamente US\$ 1 Milhão². Esse custo é demasiadamente elevado para um país em desenvolvimento. Dessa forma, é interessante ampliar o alcance dos radares o máximo possível, de forma a utilizar melhor os instrumentos que já existem. Os satélites não possuem resolução espacial suficiente para substituir os radares e nem sempre estão disponíveis, mas ainda são extremamente úteis.

Vários trabalhos recentes apontam técnicas para estender o alcance dos radares em terra usando as leituras dos satélites (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, ; CALHEIROS et al., 2000). Os sensores observam informações diferentes e de forma diferente. Os satélites observam temperatura de brilho do topo de nuvem, dado em kelvin, enquanto as imagens dos radares são em decibéis de Z, mas existem ferramentas para converter essas unidades em um padrão comum (CHEN; STAELIN, 2003).

Existem estudos para estender o alcance dos radares usando as leituras de satélite como instrumento de apoio. Por se tratar de um estudo relativamente recente, ainda é necessário que haja quantidade suficiente de eventos experimentados para que se possa tirar alguma conclusão definitiva sobre o assunto.

Fazer a conversão dos dados para um conjunto de unidades equivalentes e de igual resolução espacial é um trabalho ainda complexo. Exige não só o uso de uma função capaz de converter os tipos de unidade, como também se deve exibir os dados na mesma resolução espacial. Infelizmente, os dados de satélite e radar são distribuídos geograficamente de forma diferente, e existe a necessidade de equivaler os dados regionalmente, o que dificulta o processo, já que os pixels de satélite meteorológico possuem tamanho variável.

Trabalhos recentes estudaram a possibilidade de estender o alcance de radares nacionais, especificamente os radares meteorológicos do IPMet situados em Bauru e Presidente Prudente (CALHEIROS; D'OLIVEIRA,). A técnica proposta inclui a filtragem dos dados de radar para que fiquem na mesma resolução espacial que os de satélite, e então obter várias relações estatísticas sobre os dados. O grande problema é que essas técnicas são ainda artesanais, inviabilizando a análise de grande quantidade de dados.

²De acordo com a Vaisalas, distribuidora dos radares da Sigmet

1.3 Metodologias

Existem estudos de como ampliar o alcance útil do radar com o uso de leituras de satélite, mas os atuais procedimentos envolvem etapas quase artesanais, com cálculos sendo realizados em vários *softwares* diferentes ou mesmo manualmente, e o tempo para o preparo de um único desses eventos pode levar mais de uma semana por tal processo (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, 2007).

Para que um estudo com grande quantidade de dados possa ser realizado para esse propósito, é necessário que o processo de preparação das imagens, bem como geração dos dados que serão analisados por pesquisadores da área, seja rápido e automatizado. Os usuários deveriam entrar apenas com as imagens originais de satélite e radar (discutidas no Capítulo 2 e obter os resultados do processo proposto por Calheiros e d'Oliveira (2007) o mais rapidamente possível.

O foco do trabalho proposto é a implementação de um sistema de *software* capaz de realizar de modo automático e unificado o processamento que atualmente é feito de maneira descentralizada e artesanal. Além disso, o *software* também deveria ser capaz de exibir as imagens estudadas bem como os diversos parâmetros necessários para compará-las.

A primeira exigência do *software* proposto é que seja capaz de ler os dados originais de radar e satélite.

Essas imagens possuem uma série de diferenças que dificultam no processo de correlacioná-las. O método para equivalência desses dados será discutido em detalhe nos Capítulos seguintes, bastando por hora dizer que consiste da filtragem e re-mapeamento das imagens de radar para as coordenadas das imagem de satélite equivalentes.

Redimensionamento de imagem e interpolação (por exemplo, para a rotação) são duas das mais importantes operações de processamento de imagens e, conseqüentemente, há uma grande quantidade de literatura sobre o assunto (HARRIS et al., 1978; MITCHELL; NETRAVALI, 1988; OPPENHEIM et al., 1989; GONZALEZ; WOODS, 2007; GLASSNER, 1993; LEHMANN et al., 1999; THÉVENAZ et al., 2000; MEIJERING, 2002). No entanto, encontrar e implementar o método mais apropriado para cada situação é um desafio considerável, devido ao grande número de possibilidades e de opiniões conflitantes. É comum o contentamento com o uso de algumas abordagens bem sim-

ples que eram anteriormente destinadas a reduzir a complexidade, ou adotar uma que se mostrou excelente para uma aplicação, sem saber que essa opção pode não ser ótima para outras aplicações (SAID, 2007).

O uso de filtros em dados é feito com vários objetivos. O trabalho de Chaudhury et al. (2009) demonstra que é possível filtrar uma imagem com uma janela elíptica de tamanho e orientação variável, mas com um custo computacional fixo por pixel. Uma discussão dos efeitos da filtragem de imagens para previsão de precipitação de chuva, pode ser encontrada num trabalho recente de Horne et al. (2006).

Este tipo de filtro tem sido utilizado em trabalhos de biomedicina e de Visão Computacional (GEUSEBROEK et al., 2003), a área de cinema como o ONIMAX (FOURNIER; FIUME, 1988), e pode ainda ser aplicado na área de meteorologia com satélites. Entretanto a aplicação de um filtro gaussiano elíptico adaptativo a dados meteorológicos para possibilitar a combinação de radares meteorológicos e de satélites meteorológicos foi feita pela primeira vez por Calheiros e d'Oliveira (2007).

A tendência moderna é fazer uso combinado de todas as técnicas, medidas multi-espectrais, aproveitando o que cada uma tem de vantagem, e também aproveitando uma sinergia entre elas. Em particular imagens de radar e de satélites têm resoluções espaciais diferentes e possuem aspectos complementares, pois medem quantidades físicas diferentes, que dão informação sobre a precipitação. Existe o interesse no desenvolvimento de técnicas que permitam fazer a colocação (*collocate*) dos dados, de maneira a que possam ser utilizados de maneira combinada, e que possam ser comparados entre si (HOLL, 2009).

As imagens de satélite complementam as imagens de radar e vice-versa. Nem sempre esses dados estão disponíveis, como, por exemplo, no caso dos satélites de órbita polar, cuja frequência de passagem por uma localização geográfica é baixa. Nos oceanos é impossível instalação de redes de pluviômetros ou de radares meteorológicos. Em todos os casos há forte interesse na combinação desses dados para pesquisa, e também para monitoramento constante.

1.4 Objetivos

O foco do trabalho proposto é a implementação de um sistema de software capaz de realizar de modo automático e unificado o processamento que atualmente é feito de maneira descentralizada e artesanal. Além disso, o software também deveria ser

capaz de exibir as imagens estudadas bem como os diversos parâmetros necessários para compará-las. A primeira exigência do software proposto é que seja capaz de ler os dados originais de radar e satélite.

É utilizado um filtro gaussiano elíptico adaptativo em 2D para fazer possível a comparação de medidas de radar (CAPPPI) com imagens de satélites em órbita polar. A aplicação dessas técnicas a dados de satélites geoestacionários, também pode ser feita com o mesmo software descrito neste trabalho.

Além da automatização de todas as tarefas descritas, o software deve possuir uma interface gráfica que permita a fácil visualização das imagens estudadas, tanto em seu estado original quando nas versões já processadas. A fim de realizar esse objetivo, as ferramentas utilizadas são a API OpenGL (discutida na Sub-Sessão 4.1.1) e a biblioteca GLUT (Sub-Sessão 4.1.2). A linguagem escolhida foi C++.

Para comparar os resultados obtidos, calcula-se quatro parâmetros estatísticos como proposto por Mecklenburg et al. (2000), onde o autor lida com um problema semelhante. Com base nos valores obtidos para as imagens correspondentes de radar e satélite pode-se quantificar a qualidade do resultado obtido.

De um ponto de vista mais simplificado, o *software* resultante deve ter como entrada um par de dados, correspondentes às imagens de satélite e radar de um mesmo evento, e sua saída deve conter as imagens processadas de radar e satélite, além dos parâmetros estatísticos necessários para a análise.

1.5 Descrição dos capítulos

O Capítulo 2 descreve os instrumentos e os dados utilizados para a realização desse trabalho.

O Capítulo 3 contém a descrição das técnicas, algoritmos e métodos utilizados.

O Capítulo 4 descreve a implementação do *software*, e testes de desempenho computacional.

O Capítulo 5 consiste na exibição do *software* e em testes da qualidade do processo.

O Capítulo 6 possui as palavras finais dessa monografia.

2 DADOS E INSTRUMENTOS

Esse Capítulo tem por objetivo explicar o funcionamento e salientar as características mais importantes dos instrumentos utilizados nesse trabalho. Ele também possui a descrição detalhada do formato dos dados utilizados.

2.1 Imagens de radar

O termo Radar é acrônimo para **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging, termo criado em 1941, substituindo o termo britânico RDF, *Radio Direction Finding*, cunhado, por sua vez, em meados da década de 30. Esse dispositivo utiliza ondas eletromagnéticas para obter dados como a distância, a altitude, a direção e a velocidade de objetos, estejam eles em movimento ou estacionários. Atualmente, radares meteorológicos geram vários *terabytes* de dados por dia ao redor do mundo ([NATIONAL WEATHER SERVICE, 2007](#)).

Uma das maneiras de visualizar esses dados é a utilização de ferramentas gráficas especializadas. Graças aos avanços da Computação Gráfica, tornou-se possível fazer projeções de dados de maneira satisfatória aos usos humanos. A projeção passou de display de fósforo que podia dar apenas variações de intensidade na forma de níveis de brilho para os atuais monitores com palhetas de 16 milhões de cores ou mais. Também se tornou possível exibir dados de dimensão elevada - uma única leitura de Radar meteorológico pode gerar quase quatro *megabytes* de informação vetorial ([GARCIA et al., 2008](#)).

2.1.1 O funcionamento do radar

Um sistema de radar é a combinação de um dispositivo emissor e um dispositivo receptor de ondas eletromagnéticas. O emissor gera um pulso intenso e focado em uma determinada direção. Esse pulso eletromagnético segue sem degradação significativa até eventualmente se chocar com um objeto que seja capaz de refleti-lo. A esse objeto, dá-se o nome de refletor.

A maior parte do sinal é perdida no processo, desviada para direções diferentes daquela em que se encontra o radar. Apenas uma pequena fração do sinal refletido retorna e atinge o dispositivo receptor, que é sensível ao mesmo espectro eletromagnético que o sinal foi emitido.

É possível deduzir a distância do alvo através do tempo decorrido entre a emissão e recepção do sinal, conforme ilustra a Figura 2.1. Também é possível derivar quanto do sinal foi refletido diretamente, comparando as intensidades de sinal. Os radares meteorológicos utilizam-se primariamente dessas duas medidas, distância e intensidade, em suas leituras (ATLAS, 1990).

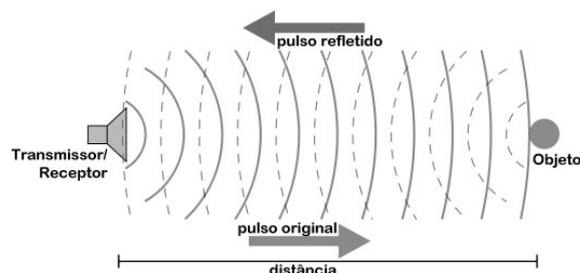


Figura 2.1 - Funcionamento do radar

2.1.2 Vantagens do uso

Sistemas de radar meteorológico são amplamente utilizados no mundo, a exemplo do NEXRAD e de redes na Austrália, Canadá e Europa.

Seus dados possuem uma resolução espacial alta para a medição meteorológica. Radares podem fazer várias amostragens por hora, tornando-se instrumentos importantíssimos para compreender não somente o formato e intensidade dos eventos de precipitação, mas também para a compreensão de como cada evento evolui com o tempo.

2.1.3 Limitações

Um dos problemas em relação aos radares meteorológicos é decorrência imediata da curvatura terrestre. Quando um feixe de energia é emitido, pode-se considerá-lo como se fosse tangente à superfície terrestre no ponto onde está localizado o radar. A altitude aumenta rapidamente conforme o feixe se afasta do radar.

Para o cálculo genérico da diferença de altitude pulso de radar e o solo, pode-se utilizar a Equação 2.1 (RINEHART, 1997), cuja visualização está na Figura 2.4.

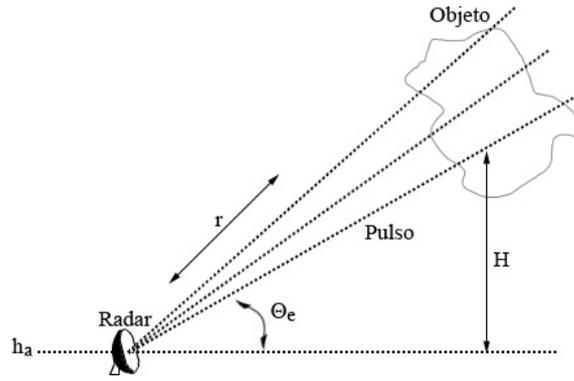


Figura 2.2 - Altura do feixe de radar

$$H = \left(\sqrt{r^2 + (k_e a_e)^2 + 2r k_e a_e \sin(\Theta_e)} \right) - k_e a_e + h_a \quad (2.1)$$

Onde:

r é a distância que o feixe percorre.

k_e é o coeficiente de refração do meio. No caso do ar, uma aproximação razoável para essa aplicação é $\frac{4}{3}$.

a_e é o raio da terra, que varia, aproximadamente, entre 6356 km e 6378 km.

Θ_e é o ângulo, em relação à componente horizontal.

h_a é a altura do feixe em relação à altura do radar.

As leituras mais distantes do radar que 450 km estão acima das nuvens, e são, portanto, inúteis para estudos relacionados à eventos de precipitação. Normalmente, o alcance útil de um radar é em torno de 240 km (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, 2007). Muitos radares podem fazer a leitura em mais de um ângulo, de uma vez só. Dados desse tipo são úteis para composições tridimensionais de nuvens e eventos de precipitação, ou para subprodutos CAPPI¹.

Outro problema bastante relevante é o efeito da atenuação atmosférica sobre o sinal transmitido. Dada sua natureza, as leituras de radar são atenuadas por qualquer objeto que encontrem, e futuras leituras naquela mesma direção, porém em distância

¹Constant Altitude Plan Position Indicator

maior, são afetadas. Em radares meteorológicos, muitas vezes tempestades podem servir como paredes, dificultando a obtenção de dados sobre eventos que estejam depois delas (AHRENS, 1988), e no caso extremo de tempestades ocorrerem exatamente acima do radar, é comum que toda a leitura seja prejudicada. A Figura 2.3 exemplifica esse comportamento.

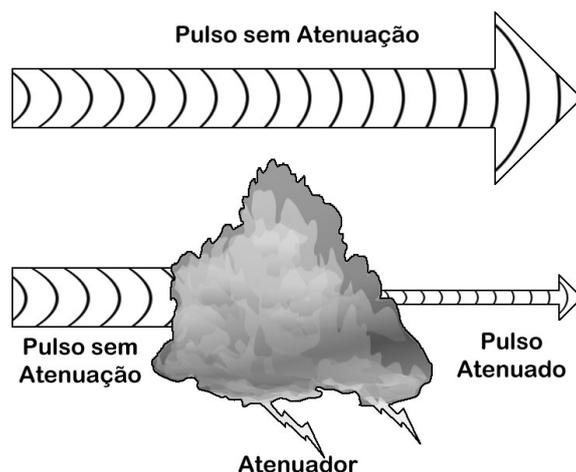


Figura 2.3 - Efeito da atenuação no sinal de radar

2.1.4 O formato CAPPI

As imagens de radar utilizados no presente trabalho estão no formato CAPPI, cujo arquivo foi previamente processada pelo IPMet.

Para a composição de um CAPPI, a antena do radar é programada de forma a dar uma volta completa (360°), alterar sua elevação em relação ao horizonte e então repetir o processo até que todas as elevações tenham sido atingidas. Dessa forma, é possível varrer completamente a atmosfera, desde o solo até o topo das nuvens. A Figura 2.4 ilustra dois CAPPI, um à 1.5 km e outro à 4 km de altitude.

De cada uma dessas elevações é extraído um anel com informações cuja altura média corresponde a um valor pré-estabelecido. A distância desse anel em relação à posição do radar varia conforme o a elevação da antena é alterada.

Ao se agrupar sequencialmente os anéis de todas as varreduras, obtém-se um campo de precipitação de 240 km de raio a partir do radar, com altitude média e amostragem constante.

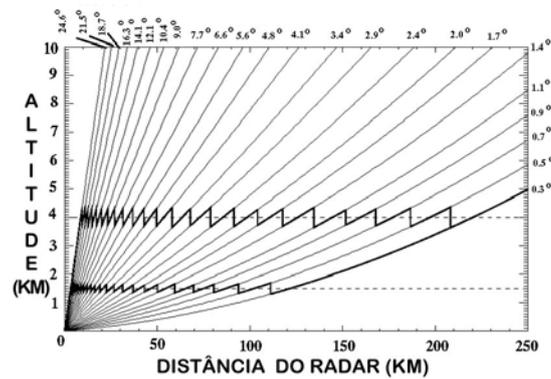


Figura 2.4 - Variação da altitude das leituras
 Fonte: <http://www.ec.gc.ca/> (2010)

2.1.5 Radares utilizados

Os dados utilizados para a realização desse trabalho são provenientes de dois radares do IPMet, situados aos arredores das cidades de Bauru e Presidente Prudente, ambas no estado de São Paulo. O radar de Bauru está situado na latitude de $22^{\circ}21'30''S$ e longitude $49^{\circ}1'42''W$, com altitude de 640 metros, enquanto o radar de Presidente Prudente está em latitude $22^{\circ}10'30''S$ e longitude $51^{\circ}22'30''W$, e sua altitude é de 493 metros. Ambos os radares operam em banda S, que engloba frequências que vão de 2,0 to 4,0 GHz, encobrendo as frequências de UHF e de SHF até a 3,0 GHz. Um desses aparelhos pode ser visto na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Radar do IPMET de Presidente Prudente

O *software IRIS* foi produzido pela *SIGMET*, empresa norte-americana que em 2006 entrou para o *Vaisala Group*, e é o sistema de gerenciamento dos radares meteorológicos do IPMet. Esse *software* não permite a obtenção de dados brutos do radar, somente dados processados com possibilidade de parametrização. O produto PPI é gerado a partir de uma única varredura de 360°, em 3 RPM, com a elevação da antena em 0° e raio de alcance de 450 km.

2.1.6 Dados utilizados

As imagens CAPPI são apresentadas na forma de arquivos ASCII formatados em três colunas de valores numéricos, representando uma imagem de 480 × 480 pixels. A primeira e a segunda coluna, de valores inteiros, representam as coordenadas nos eixos x e y de um determinado pixel, enquanto a terceira coluna indica seu valor em dBZ, conforme a tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Trecho de um arquivo com dados CAPPI em ASCII

X	Y	dBZ
171	25	9.500000
172	25	9.500000
173	25	9.500000
168	26	16.000000
169	26	15.000000
170	26	10.500000
171	26	11.500000
172	26	11.500000

Por estarem em formato ASCII, cada arquivo de dados ocupa bem mais espaço do que se fossem dados binários. Por outro lado, a formatação no estilo matriz dinâmica permite reduzir parte desse problema ao não necessitar de dados para células vazias, ou seja, apenas as leituras com valores superiores a zero são armazenadas no arquivo (DEITEL; DEITEL, 1998).

2.2 Imagens de satélite

Nos primeiros anos da meteorologia por satélite, houve muitas tentativas de derivar algum tipo de informação sobre eventos de precipitação das nuvens vistas pelas imagens de satélite, particularmente do ponto de vista da previsão de inundações

bruscas.

O problema básico aqui é que o conhecimento apenas da refletividade ou da temperatura do topo de uma nuvem não é suficiente para inferir que tipo de estrutura vertical existe abaixo dele, e é muito difícil atribuir uma taxa de chuva a partir disso. Pior ainda, em imagens com pixels representando grandes áreas, a precipitação estimada não pode ser comparada diretamente com medidas mais precisas feitas por instrumentos em terra, como pluviômetros (KELKAR, 2007).

Muitas das técnicas que foram desenvolvidas inicialmente eram particularmente empíricas, e possuíam aplicações baseadas na localização. Algumas técnicas eram mais úteis para propósitos climatológicos (ADLER; MACK, 1984).

2.2.1 Vantagens do uso

Satélites meteorológicos não sofrem dos efeitos topográficos locais da mesma forma que os radares. Radares têm seu campo de visão bloqueado por montanhas mais altas, diminuindo sua utilidade em vários casos, mas o mesmo não ocorre com o satélite, que observa os eventos de cima.

Além disso, as leituras de satélite meteorológico se concentram nos dados de topo de nuvem, não penetrando muito profundamente em suas estruturas, de forma que o sinal sofra um mínimo do efeito de atenuação atmosférica. Os radares não possuem essa opção, e muitas vezes tempestades pontuais muito próximas ao instrumento agem como verdadeiras muralhas, impedindo que dados mais distantes naquela direção possam ser estudados com segurança (ANTÔNIO, 1998).

Uma grande vantagem do uso de satélites é sua abrangência geográfica, ou seja, o alcance de sua cobertura (MENDELSON et al., 2007). Países em desenvolvimento, que não podem arcar com as despesas de uma rede de observação meteorológica em todo seu território, bem como regiões oceânicas ou polares (onde a instalação de instrumentos como o radar não é viável) se beneficiam grandemente dos dados de satélite.

2.2.2 Principais problemas

Os dados de satélite meteorológico possuem uma resolução espacial muito baixa, se comparados com sensores em terra, e existem estudos comparativos entre o uso

entre satélite e estações terrestres nas medidas meteorológicas, como Mendelsohn et al. (2007).

Além da baixa resolução espacial, os satélites meteorológicos observam apenas o topo das nuvens, não sendo capazes diretamente de obter informações sobre o que ocorre abaixo delas. Comparativamente, um único *pixel*² de uma imagem satélite pode equivaler a uma área medida por mais de 600 *pixels* de uma imagem equivalente de radar.

A variação das unidades também é um problema, pois enquanto uma área de *pixels* de radar pode possuir, por exemplo, uma média de 8 dBZ em relação à outra, tal diferença pode chegar a 100 K na temperatura de brilho medida pelo satélite (CALHEIROS; TEPEDINO, 2006).

Um problema mais grave com esse tipo de instrumento é que a curvatura da Terra afeta as leituras distantes de maneira severa. Os *pixels* passam a representar áreas maiores conforme se afastam do centro da imagem, de forma semelhante ao efeito das lentes olho-de-peixe, exemplificado na Figura 2.6.

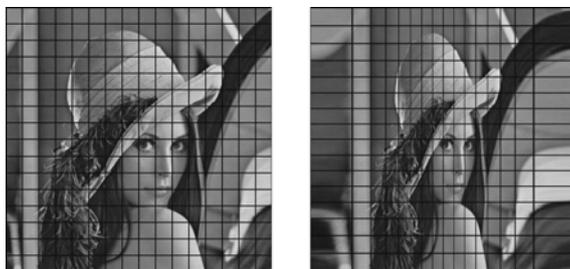


Figura 2.6 - Distorção do tipo olho-de-peixe com imagem normal a esquerda e distorcida a direita.

Esse efeito varia conforme a latitude e a longitude, mas com o centro da imagem próximo à 22°S e 50°W, região dos dados estudados, a resolução espacial pode variar de 11 km a até 35 km (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, 2007). Essa variação é mais perceptível em um dos eixos da imagem que no outro, devido à natureza do sensor. A variação da resolução espacial se torna um problema ainda maior ao compararmos os dados com os de radar, que possuem resolução espacial relativamente constante.

²Picture Element, o menor elemento de uma imagem

As imagens de satélite nem sempre estão disponíveis para um determinado evento de precipitação. Diferentemente dos radares, que observam constantemente uma mesma região, satélites polares como o NOAA-18 amostram um mesmo ponto poucas vezes por dia. Para piorar, muitas vezes os dados só existem para parte da região de interesse, o que nem sempre é útil.

2.2.3 Satélite utilizado

As imagens de satélite utilizadas nesse trabalho foram todas geradas pelo satélite NOAA-18, um satélite pertencente ao projeto POES³. Foi lançado em 20 de maio de 2005, atualmente⁴ em estado operacional e em uma órbita solar síncrona 854 km acima da Terra, com um período orbital de 102 minutos. A Figura 2.7 é uma ilustração de tal satélite.



Figura 2.7 - Ilustração do satélite NOAA-18

Fonte: <http://www.star.nesdis.noaa.gov> (2010)

O Satélite NOAA-18 é um satélite meteorológico utilizado primariamente para previsão do tempo, e possui a bordo os instrumentos AMSU-A, MHS, AVHRR e HIRS. Notoriamente, é o primeiro satélite POES NOAA a ter um instrumento MHS no lugar do AMSU-B. Sua frequência de transmissão APT é 137.10 MHz.

2.2.3.1 MHS

O Satélite NOAA-18, da NOAA, foi pioneiro no uso do instrumento do MHS, seguido pela Agencia Espacial Européia com o MetOp-A em outubro de 2006. É um radiômetro passivo de microondas com cinco canais variando de 89 a 190 GHz.

³Polar Operational Environmental Satellite

⁴Em 20 de abril de 2010

É muito similar em design ao instrumento AMSU-B, mas a frequência de alguns canais foi alterada. É utilizado no estudo de perfis atmosféricos de vapor d'água.

Para esse trabalho, apenas o canal 5 do instrumento é utilizado, corresponde à frequência de 190.311 GHz. Possui polarização Vertical, sensibilidade NEDT de 0.46 K, com uma largura de banda de 2200 MHz. Esse canal é o responsável pelas leituras da temperatura de topo de nuvem. Um exemplo das imagens desse instrumento é dado na Figura 2.8

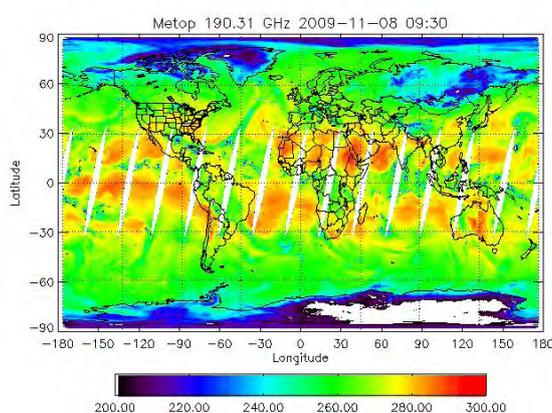


Figura 2.8 - Exemplo do canal 5 do MHS
Fonte: <http://www.osdpd.noaa.gov> (2010)

2.2.4 Formato dos dados

O HDF é um padrão estabelecido pela NCSA (NCSA, 1998), e atualmente mantido pelo HDF Group. Em seu nível mais baixo, pode-se dizer que o HDF é a definição de um formato de arquivo físico para a armazenagem de dados científicos. Para esse intuito, existem definições de vários tipos de dados, bem como uma estrutura hierárquica em que são armazenados. Pensando do ponto de vista de um desenvolvedor, o HDF é um conjunto de ferramentas e aplicações destinadas à manipulação, visualização e análise de dados de arquivos no formato HDF.

Entre esses dois níveis citados, o HDF é também uma biblioteca de *software* organizada fornecendo uma API de alto nível para dados de baixo nível. O formato de dados HDF é bastante utilizado para armazenar imagens de satélite.

A versão do HDF utilizada nesse trabalho é o HDF4. Essa versão é a utilizada nos dados do instrumento MHS do satélite NOAA-18, utilizado nesse trabalho como fonte de dados.

2.2.4.1 Descrição dos dados

Os dados do instrumento MHS do satélite NOAA-18 são apresentados como uma árvore de diretórios contendo as informações. A raiz, chamada *MHS_Swath*, ainda contém dados sobre a versão do arquivo e sua estrutura.

No diretório Geolocation, existem dados relacionados com o momento em que cada leitura foi realizada, bem como a Latitude e Longitude de cada um dos pontos lidos, ambas as medidas apresentadas em matrizes de 90 por aproximadamente 2500 pontos, em dados do tipo ponto flutuante.

O diretório Data Fields contém os dados dos cinco canais, em matrizes de tamanho idêntico às da latitude e longitude. Possui algumas informações sobre o instrumento e sobre outras medidas derivadas. O trabalho proposto utiliza os dados da matriz Chan5_AT.

Por fim, no diretório Swath Attributes, encontram-se dados relacionados à calibração do instrumento e informações relativas ao satélite.

2.2.5 Obtenção dos dados

É possível obter gratuitamente os dados de satélite necessários para o estudo desenvolvido. Eles podem ser acessados no site <http://www.class.ncdc.noaa.gov/saa/products/welcome>. É necessário registro. Os dados são do tipo *MSPPS Orbital Data*, com *Datatype MSPPS MHS Orbital HDF Format*, do satélite NOAA-18.

Os dados de radar foram fornecidos diretamente pelo IPMet.

2.3 Dificuldades de correlacionar imagens de sensores diferentes

Correlacionar as imagens de radar e satélite não é uma tarefa trivial. Existem muitas diferenças entre os formatos dos dados.

Os dois instrumentos mensuram características distintas dos eventos de precipitação,

e a forma de correlacioná-los ainda é assunto de estudo (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, 2007; CALHEIROS; D'OLIVEIRA, ; CALHEIROS et al., 2000; Pereira Filho et al., 2004). Tais relações são chamadas de $T_b - Z$ (temperatura de brilho – Z), e são usualmente calculadas a partir do estudo de uma grande quantidade de eventos de precipitação com imagens de radar e satélite. De acordo com Calheiros e d'Oliveira (2007), essas relações são sujeitas inclusive a onde no planeta foram realizadas as medidas, ou seja, são localmente variáveis.

Além disso, as imagens de satélite e de radar são afetadas de maneira diferente pela curvatura da Terra, pela geografia local e por efeitos atmosféricos. Qualquer tentativa de fazer uma equivalência pixel-a-pixel se torna complicada e é necessário o uso de técnicas mais complexas, conforme descrito em Calheiros e d'Oliveira (2007), para fazer uma equivalência que possa servir para estudos. Operações com imagens são de natureza matricial, e a complexidade de sua computação cresce rapidamente.

3 TÉCNICAS E METODOLOGIA

A ciência da computação é repleta de áreas com amplas possibilidades de estudo. Quando se diz respeito a processamento de imagens, a quantidade de técnicas e métodos é estonteante. Quando o foco é uma aplicação específica, no entanto, é possível reduzir essa grande gama a uma quantidade mais administrável. Este capítulo descreve exclusivamente as técnicas e métodos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 Equivalência de imagens de radar e satélite

São várias as características que diferenciam as imagens de radar e satélite utilizadas no presente trabalho, conforme discutido no Capítulo 2: medem diferentes características dos eventos de precipitação, a distribuição geográfica das leituras diverge, as resoluções são sensivelmente diferentes e são afetados diferentemente pela variação da curvatura terrestre. Além disso, possuem unidades diferentes – decibéis em Z para a intensidade medida pelo radar, e kelvin para a temperatura de brilho dos dados de satélite.

É muito difícil estudar as relações existentes entre imagens tão diferentes. O trabalho desenvolvido em (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, 2007) descreve um processo para igualar as duas imagens de forma a possuírem mesma resolução e semelhante efeito de distorção geométrica, de forma que as técnicas tradicionais para obtenção de conhecimento possam ser utilizadas sem problemas.

O procedimento descrito na Sessão 3.1 é uma expansão e generalização do método descrito em (CALHEIROS; D'OLIVEIRA, 2007), da forma que foi implementado pelo presente trabalho.

3.1.1 Pré-Requisitos e escopo

Antes que qualquer processamento possa ser realizado, é necessário conhecer as posições aproximadas de cada *pixel* de ambas as imagens em coordenadas equivalentes. No caso estudado, essas coordenadas são a Latitude e Longitude.

As imagens estudadas possuíam características bastante particulares. As imagens CAPPI de radar possuem 480×480 *pixels*, com resolução espacial aproximadamente constante de 1 km. No caso das imagens de satélite, a definição é de cerca de $24 \times$

26 *pixels*, com pequenas variações ocorrendo. Além disso, sua resolução espacial pode variar bastante; no eixo x , varia de 11 km até 35 km, enquanto no eixo y , normalmente permanece entre 17 km e 18 km. A Figura 3.1 ilustra essa diferença, com pontos pretos representando *pixels*.

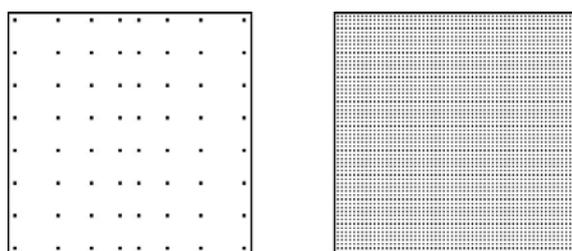


Figura 3.1 - Ilustração comparativa da imagem de satélite (esquerda) com radar (direita)

3.1.2 Descrição simplificada do procedimento

O procedimento realizado consiste em uma série de passos seqüenciais, cada constituído por um conjunto de operações efetuadas uma das matrizes. Excluindo os passos computacionais de entrada e saída dos dados, pode-se resumir as ações executadas no esquema mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Procedimento realizado

3.1.3 Ajustes Preliminares

Antes que o processo seja realizado, são necessários alguns ajustes em ambas as imagens.

3.1.3.1 Ajuste de unidades

É imprescindível que as duas imagens estejam trabalhando com o mesmo tipo de unidade para realizar qualquer comparação.

Esse tipo de relação, também conhecido na literatura como $T_b - Z^1$, é um passo fundamental para o trabalho. Existem vários tipos de conversão de dados, baseados nas relações específicas $T_b - Z$.

Como existem estudos onde o foco de interesse é o ajuste da relação $T_b - Z$ propriamente dita, é interessante para o presente projeto que seja possível alterar a relação utilizada. No trabalho desenvolvido por Calheiros e d'Oliveira (2007), eram utilizados os polinômios descritos pela Equação 3.1, em especial pela Relação 3, apontada na Tabela 3.1. Essas relações são de grande importância, pois permitem se ter uma idéia mais precisa do comportamento das precipitações do que apenas com a temperatura de brilho do topo de nuvem.

$$Z(r) = +c_1 \cdot r^3 + c_2 \cdot r^2 + c_3 \cdot r + c_4 \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 - Valores das constantes para relações $T_b - Z$ estudadas

Relação	a_1	a_2
R_1	-0.00073547286000	+0.48706851814000
R_2	-0.00038572002000	+0.25812121727000
R_3	-0.00010139903800	+0.06165554575900
R_4	-0.00000127609433	-0.00014587010660
Relação	a_3	a_4
R_1	-107.74141756785000	+7973.94156483475000
R_2	-57.79074481430800	+4358.20423031243000
R_3	-12.84554724705000	+947.71758002371800
R_4	-0.12683910823059	+71.92705918076791

A aplicação de uma relação $T_b - Z$ é simples. Seja S uma imagem de satélite com $i \times j$ *pixels* cujos valores representam Temperatura de Brilho, e seja R_s uma matriz de $i \times j$ *pixels* de tal maneira que o i, j -ésimo *pixel* da imagem R_s seja o equivalente em Decibéis em z do i, j -ésimo *pixel* da imagem S , então a Equação 3.2 representa

¹Onde T_b é a temperatura de brilho, em Kelvin, e Z é a refletividade, em decibéis de Z

esse procedimento.

$$Z(S) = R_s \tag{3.2}$$

3.1.3.2 Mudanças de coordenadas

As resoluções das imagens de radar e satélite são bastante diferentes, e para que possam ser comparadas elas devem ser re-mapeadas em uma mesma grade de pontos. Esse processo inicia-se com a equivalência dos sistemas de coordenadas.

Nas imagens de satélite, os dados são apresentados como uma matriz de 90 por 2500 (apesar de o segundo valor variar para cada imagem), com suas linhas e colunas representando segmentos de reta que, em distancias relativamente curtas (algumas centenas de quilômetros), são paralelas entre sí, conforme ilustra a Figura 3.3.

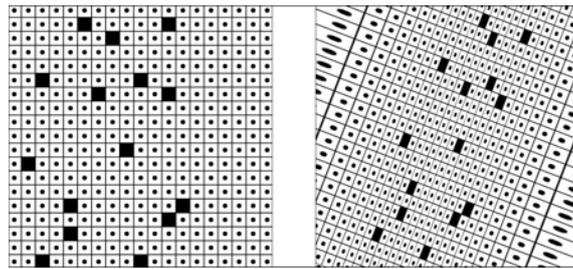


Figura 3.3 - Imagem de satélite com coordenadas matriciais a esquerda e Latitude-Longitude a direita.

Apesar de uma única leitura de satélite conter dados de uma enorme faixa de aproximadamente 2 mil km por 40 mil km representada por mais de 200 mil *pixels*, o presente trabalho foca-se apenas na região localizada a até 240 km da posição do radar, com aproximadamente 600 *pixels*. É uma área de interesse é bem menor, em torno de 25×26 *pixels*, correspondendo à área coincidente com a leitura do radar, como mostra a Figura 3.4. Como essa matriz possui um aspecto mais próximo de uma imagem propriamente dita, e sua resolução é menor, ela será utilizada como base para a redução da imagem de radar.

As imagens de radar estudadas são apresentadas em matrizes de 480×480 *pixels* e sua resolução espacial é de 1 km. Pode-se observar um exemplo dessa imagem na

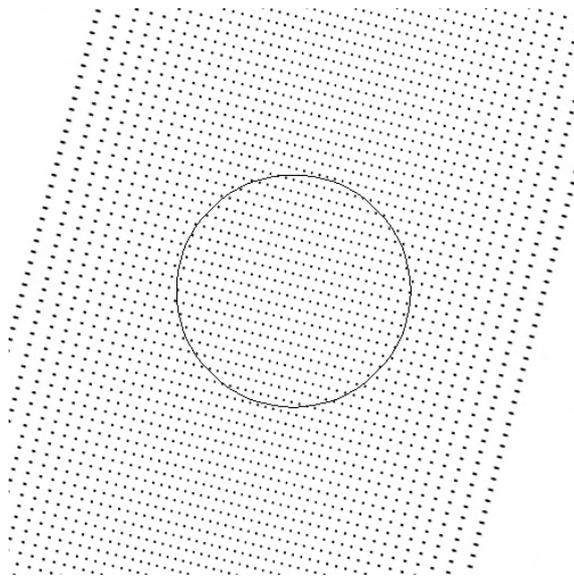


Figura 3.4 - Posição do radar numa leitura de satélite

Figura 3.5.

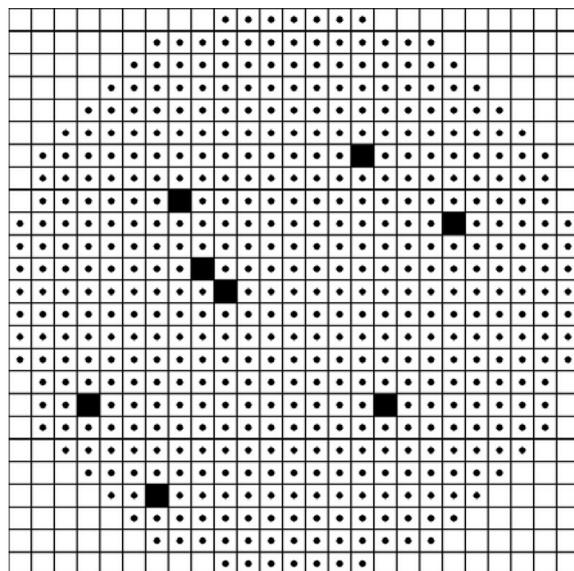


Figura 3.5 - Modelo de uma imagem de radar

Os eixos x e y não estão alinhados entre as duas imagens, levando-se em consideração as latitudes e longitudes de cada ponto. Enquanto as imagens de radar possuem eixos praticamente paralelos aos eixos de Latitude e Longitude da Terra, as imagens de

satélite normalmente possuem uma inclinação, fato ilustrado na Figura 3.6. Tomadas individualmente, no entanto, as colunas e as linhas das imagens de satélite e radar podem ser consideradas paralelas em relação a latitude e longitude para o escopo desse trabalho.

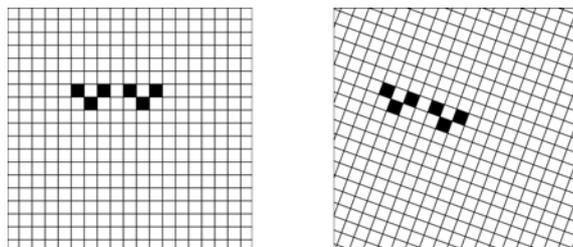


Figura 3.6 - Imagem de radar a esquerda e satélite a direita, baseadas nos eixos latitude e longitude

Computacionalmente, esse problema é significativo. Todo o processo descrito por Calheiros e d'Oliveira (2007) depende da Latitude e Longitude dos *pixels*, mas utilizar esses valores como coordenadas elevaria significativamente a complexidade do problema, já que os dados estão indexados de acordo com os eixos das matrizes, e não coordenadas esféricas. Se ambas as matrizes estivessem num mesmo conjunto de coordenadas discretas, ou seja, se suas linhas e colunas fossem paralelas entre si, seria então possível utilizar diretamente das coordenadas matriciais ao invés de latitude e longitude.

O problema é resolvido com uma simples rotação em duas dimensões da imagem de radar. A posição nova de cada *pixel* da imagem de satélite é dado pelo valor aproximado de $\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$ na Equação 3.3, onde θ é a inclinação da imagem de satélite em relação a imagem de radar com base na latitude e longitude. O valor de θ é facilmente obtido através de regressão linear (HEARN; BAKER, 1996).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Depois de todos os passos realizados, as duas matrizes estão prontas para serem processadas.

3.1.4 Cálculo da resolução espacial da imagem

A resolução espacial em x e em y são normalmente ser iguais em imagens convencionais; em imagens de satélite, no entanto, isso não é necessariamente verdade. No caso de estudo, os *pixels* das imagens do radar representam áreas com 1 km de lado, mas as imagens de satélite tem essas dimensões no intervalo de 11 km a até 35 km no eixo x , embora o eixo y varie entre apenas de 17 km e 18 km.

Definindo-se $\Delta x_{i,j}$; $\Delta y_{i,j}$ como a resolução espacial em x e y respectivamente, o processo de obtenção de cada desses valores é realizado calculado a distância entre o centro dos *pixels* diretamente vizinhos ao *pixel* em questão, nos eixos x e y respectivamente, conforme ilustra a Figura 3.7.

Sejam (ϕ_s, λ_s) ; (ϕ_f, λ_f) a latitude e longitude de dois pontos na superfície terrestre respectivamente, $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ suas diferenças, o ângulo entre esses dois pontos $\Delta\hat{\sigma}$ é dado pela Equação 3.4.

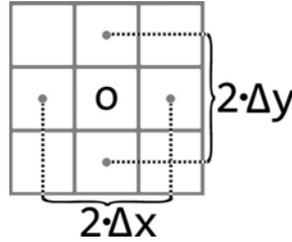


Figura 3.7 - Ilustração do cálculo da distância entre *pixels*

$$\Delta\hat{\sigma} = \arctan \left(\frac{\sqrt{(\cos \phi_f \operatorname{sen} \Delta\lambda)^2 + (\cos \phi_s \operatorname{sen} \phi_f - \operatorname{sen} \phi_s \cos \phi_f \cos \Delta\lambda)^2}}{\operatorname{sen} \phi_s \operatorname{sen} \phi_f + \cos \phi_s \cos \phi_f \cos \Delta\lambda} \right) \quad (3.4)$$

A distância em quilômetros entre dois pontos na superfície é dada pela multiplicação do raio terrestre R por $\Delta\hat{\sigma}$. Em outras palavras, $R \cdot \Delta\hat{\sigma} = \Delta_{s,f}$. Uma aproximação mais precisa de R é dada por $a_e = R = R(\phi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cos(\phi))^2 + (b^2 \operatorname{sen}(\phi))^2}{(a \cos(\phi))^2 + (b \operatorname{sen}(\phi))^2}}$; onde a é o raio equatorial, $a \approx 6,378.1370km$, e b é o raio polar, $b \approx 6,356.7523km$.

3.1.5 Associação de *pixels* entre as imagens

Outro ponto importante é a associação de *pixels* entre as imagens. Cada *pixel* da imagem de radar é associado a um único *pixel* da imagem de satélite. Essa associação é feita com base na distância do centro do *pixels* de cada imagem; cada *pixel* da imagem de radar é associado ao *pixel* da imagem de satélite cujo centro é mais próximo de si mesmo, conforme ilustra a Figura 3.8.

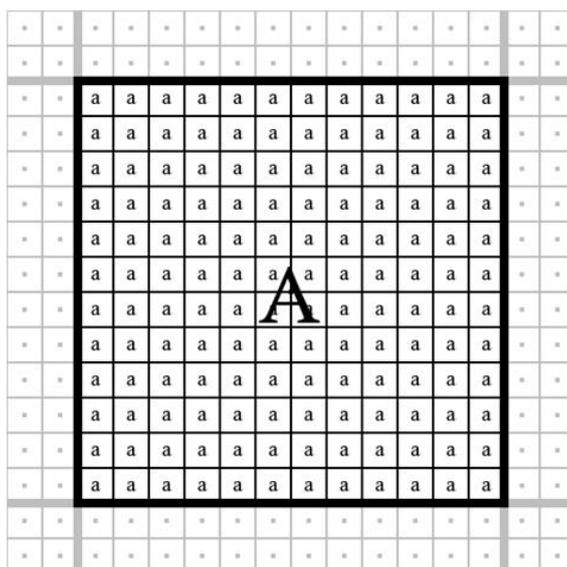


Figura 3.8 - Associação de *pixels*

3.1.6 Filtragem

Uma vez obtido o par de imagens nas mesmas unidades e em sistemas de coordenadas equivalentes, surge o problema da filtragem. Os *pixels* das imagens do radar representam áreas com 1 km de lado, mas as imagens de satélite variam essas dimensões de 11 km a até 35 km no eixo x , embora o eixo y varie entre apenas 17 km e 18 km.

O trabalho descrito por Calheiros e d'Oliveira (2007) lida com esse problema através da suavização e redução da imagem de radar. Assim, é necessário encontrar uma forma de suavizar os dados da matriz do radar para que eles sejam mais semelhantes aos equivalentes em satélite. Essa suavização, porém, não é uniforme. Ela deve acompanhar a variação da resolução espacial dos *pixels* de satélite, que não é

uniforme. A variação também é diferente para os o eixo x e y da imagem.

Como o trabalho está sendo realizado em imagens, pode-se assumir que a influência de cada elemento na área representada por um *pixel* no nível de brilho do mesmo está associada a uma distribuição gaussiana (GONZALEZ; WOODS, 2007). Assim, a solução apontada foi o cálculo de um filtro gaussiano para suavizar as imagens de radar.

Devido ao efeito da variação da resolução espacial ser diferente em cada eixo, esse filtro deve ser elíptico. Como a variação é diferente conforme a posição na imagem, é necessário que esse filtro também seja variável, adaptando-se a cada variação.

O filtro descrito pela Equação 3.5 foi descrito no trabalho de Calheiros e d'Oliveira (2007) como *Filtro Gaussiano Elíptico Não-Linearmente Variável*, onde:

(i, j) são as coordenadas de um *pixel* da imagem de satélite.

(a, b) são as coordenadas de um ponto do filtro.

$\Delta x_{i,j}$ é a resolução espacial em x do *pixel* (i, j) , aproximado para o ímpar mais próximo.

$\Delta y_{i,j}$ é a resolução espacial em y do *pixel* (i, j) , aproximado para o ímpar mais próximo.

$$Filtro_{i,j}(a, b) = \frac{\exp\left(-\left(\left(\frac{a - \frac{\Delta x_{i,j}}{2}}{\Delta x_{i,j}}\right)^2 + \left(\frac{b - \frac{\Delta y_{i,j}}{2}}{\Delta y_{i,j}}\right)^2\right)\right)}{\sum_{w=0}^{\Delta x_{i,j}} \sum_{z=0}^{\Delta y_{i,j}} Filtro_{i,j}(w, z)} \quad (3.5)$$

Depois de criado o filtro, o processo de filtragem é relativamente simples. O Filtro tem dimensão $\Delta x_{i,j} \times \Delta y_{i,j}$, e como ambos os valores são ímpares, é possível notar que a matriz possui também um ponto central. Assim, basta aplicar o filtro normalmente, conforme descrito em Gonzalez e Woods (2007).

3.1.7 Ajuste de resolução

O último passo é reduzir a resolução real do radar. Com a filtragem, essa resolução já foi reduzida virtualmente, mas ainda resta que os dados sejam equivalentes ponto-

a-ponto. A matriz de radar ainda possui resolução de 480×480 *pixels*, e deve ser convertida em uma matriz de aproximadamente 25×26 (variando caso a caso).

Cria-se uma imagem do mesmo tamanho da imagem de satélite. Atribui-se para cada *pixel* dessa nova imagem a média dos n *pixels* de radar já filtrado associados ao pixel de satélite equivalente. Essa conversão é chamada de *re-mapeamento* dos *pixels*, posto que agora cada *pixel* da matriz 26×27 a ser gerada representa uma quantidade variável de *pixels* da matriz 480×480 já filtrada.

3.2 Metodologia para análise dos resultados

No método descrito na Sessão 3.1, se obtém como resultado um par de matrizes. A primeira matriz nada mais é que a imagem de satélite com as unidades alteradas para decibéis em Z , mas a segunda imagem é uma composição inteiramente nova baseada na imagem de radar. Ambas imagens estão na mesma resolução e seus pixels representam as mesmas regiões no mundo real.

É muito difícil para um ser humano avaliar quantitativamente um procedimento realizado em uma imagem. Ao mesmo tempo, uma simples comparação computacional pixel-a-pixel pode não ser capaz de encontrar relacionamentos complexos que seriam óbvios para um observador. É necessária então uma solução mais elaborada e própria para o tipo de tarefa realizada. Na presente sessão, será descrito o processo de avaliação do desempenho do procedimento anteriormente descrito.

3.3 Análise estatística

Para comparar as imagens, será utilizada a metodologia proposta no trabalho de [Mecklenburg et al. \(2000\)](#), onde o autor lida com um problema semelhante. A solução por ele apontada consiste no cálculo de seis parâmetros estatísticos, nomeados de P_1 até P_6 . Para o caso específico do presente trabalho, os parâmetros P_2 e P_3 não são aplicáveis. Os demais parâmetros são descritos a seguir.

P_1 é o “erro absoluto” é definido pela distância entre centros de massa das duas imagens. Considerando como $R_{i,j}$ o i, j -ésimo pixel da imagem de Radar, e $S_{i,j}$ o i, j -ésimo pixel da imagem de Satélite, ambas já processadas. Esse parâmetro permite uma estimação da probabilidade das duas imagens serem iguais. Quanto menor o valor, mais próximas são. P_1 é descrito pela Equação 3.6. A Figura 3.9 exemplifica essa operação. P_1 é dado em quilômetros nesse caso.

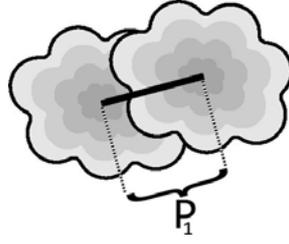


Figura 3.9 - Ilustração do parâmetro P_1

$$P_1 = \left| \frac{\sum_{i,j} \vec{i} \cdot S_{i,j} + \vec{j} \cdot S_{i,j}}{\sum_{i,j} S_{i,j}} - \frac{\sum_{i,j} \vec{i} \cdot R_{i,j} + \vec{j} \cdot R_{i,j}}{\sum_{i,j} R_{i,j}} \right| \quad (3.6)$$

P_4 é a razão da mediana dos valores dos *pixels* de cada imagem. Pode ser interpretada como uma quantificação do sucesso que a imagem de satélite com unidades ajustada obteve em atingir o valor absoluto da imagem de radar filtrada. Esse valor é melhor quanto mais próximo de 1. A Equação 3.7 é a demonstração do cálculo desse parâmetro.

$$P_4 = \frac{\text{Mediana}(R)}{\text{Mediana}(S)} \quad (3.7)$$

P_5 é a razão dos intervalos $((0.75 - \text{quantil}) - (0.25 - \text{quantil}))$ de ambas as imagens, e indica o grau de sucesso alcançado em se reproduzir a variação de intensidades nas imagens processadas. A Equação 3.8 ilustra o cálculo realizado.

$$P_5 = \left| \frac{\text{Quantil}_{25}(R) - \text{Quantil}_{75}(R)}{\text{Quantil}_{25}(S) - \text{Quantil}_{75}(S)} \right| \quad (3.8)$$

P_6 é o coeficiente de correlação entre as imagens de satélite com unidade ajustada e as imagens de radar filtradas, e quantifica a semelhança global de ambas tais imagens. É dado pela Equação 3.9.

$$P_6 = \rho_{R,S} \quad (3.9)$$

Para facilitar a leitura e análise dos resultados, esses parâmetros ainda passam por

um processo de normalização. Os parâmetros P_4 e P_5 são multiplicador por 100%. Como um passo opcional de normalização, esses mesmos parâmetros são mostrados no software em duas versões: variando no intervalo de $[0, \infty)$, de maneira a ser possível saber se os valores de satélite ou radar eram maiores, e da maneira completamente normalizada, no intervalo $[0, 100\%]$, que mostra apenas a proporção absoluta dos valores.

Tabela 3.2 - Valores ótimos para os parâmetros estatísticos

Parâmetro	Valor Ótimo
P_1	0 km
P_4	100%
P_5	100%
P_6	1

É necessário entender que os parâmetros são utilizados para comparar as imagens, a fim de avaliar o quão bem o processo de conversão de dados, que abrange desde a mudança de unidades até a filtragem e re-mapeamento da imagem de radar, foi efetuado. De acordo com Calheiros e d'Oliveira (2007), o grau de semelhança das imagens permite verificar se a relação $T_b - Z$ usada para converter os dados de satélite de Temperatura de Brilho (em kelvin) para Refletividade (em decibéis de Z) indicada na Sub-Sessão 3.1.3.1 é indicada para um determinado conjunto de eventos.

Os parâmetros estatísticos são individualmente necessários, mas não suficientes, para a equivalência das imagens. Se os quatro parâmetros indicarem simultaneamente a semelhança das imagens numa grande quantidade de eventos distintos, pode-se concluir que não somente a relação $T_b - Z$ escolhida foi acertada, mas como todo o processo de redução e filtragem da imagem de radar também foi realizada com sucesso.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Os métodos descritos no Capítulo 3 foram implementados computacionalmente para esse trabalho. O presente Capítulo descreve as técnicas e algoritmos utilizados nessa implementação.

4.1 Ferramentas computacionais

A aplicação desenvolvida utilizou-se de algumas ferramentas computacionais específicas, descritas a seguir.

4.1.1 OPENGL

OpenGL (Open Graphics Library) é uma API multi-plataforma para a produção de aplicativos que produzam gráficos computadorizados 2D e 3D. Consiste de mais de 250 funções diferentes que podem ser utilizadas para desenhar desde primitivas gráficas simples até complexas cenas tri-dimensionais. Foi desenvolvido pela Silicon Graphics Inc (SGI) em 1992 (WRIGHT; LIPCHAK, 2004) e é amplamente utilizado em CAD (Computer Assisted Design - Design auxiliado por computador), realidade virtual, visualização científica, visualização de informação, simulações de vôo e em videogames. OpenGL é mantido por um consórcio tecnológico sem fins lucrativos, o Khronos Groups.

Uma das maiores vantagens do OpenGL é o fato de ser uma API livre, distribuída gratuitamente na internet e suportada por uma grande quantidade de linguagens e plataformas. Possui uma comunidade grande de usuários que participa ativamente de listas de discussão bastante didáticas, além de serem de grande ajuda na resolução de dúvidas. A documentação é bem completa e atualizada, e excelentes livros-texto são disponibilizados gratuitamente no site do desenvolvedor, o que facilita não só o aprendizado, mas a própria prevenção de problemas (NEIDER et al., 2005; OPENGL, 1997; WRIGHT; LIPCHAK, 2004).

O uso dessa API no presente trabalho está voltado exclusivamente para a visualização das imagens de radar e satélites estudados, permitindo que os usuários da ferramenta desenvolvida possam rapidamente comparar as diferentes leituras desses instrumentos.

4.1.2 GLUT

GLUT, sigla para OpenGL Utility Toolkit, é uma biblioteca de utilidades para programas em OpenG, fornecendo à API funções para controle de entrada e saída, entre as quais se incluem definição e controle de janelas, e também monitoramento de entradas por teclado e mouse.

Sub-rotinas para desenhar uma quantidade significativa de primitivas geométricas também fazem parte da biblioteca, como cubos, esferas e mesmo a Chaleira de Utah. O GLUT tem até mesmo um suporte limitado para a criação de menus pop-up (KILGARD, 1996).

Os objetivos do GLUT são permitir a criação de aplicativos de fácil portabilidade (multi-plataforma) e tornar o aprendizado de OpenGL mais fácil. Todas as funções de da biblioteca começam com o prefixo "glut", enquanto todas as funções de OpenGL são iniciadas apenas por "gl".

Para o presente trabalho, o GLUT foi escolhido por tornar simples algumas tarefas que, de outra forma, seriam uma reinvenção da roda. Além disso, havia prévia experiência em seu uso na criação de ferramentas para visualização de dados meteorológicos, o que acelera o processo.

4.1.3 C++

C++ é uma linguagem de programação de para uso geral. É considerada uma linguagem de médio-nível, posto que compreende características de linguagens de ambos baixo e alto-nível. Foi desenvolvida por Bjarne Stroustrup a partir de 1979 nos Laboratórios Bell como uma melhoria da linguagem C (STROUSTRUP, 1996).

É usada amplamente na indústria do *software*, e algum de seus domínios de aplicação incluem sistemas operacionais, aplicativos, drivers de dispositivo, *software* embarcado, programação de alto-desempenho, servidores, além de entretenimento, como videogames (DEITEL; DEITEL, 1998; ECKEL, 1995).

C++ é uma linguagem compilada de tipagem estática, e multi-paradigma. Vários compiladores são distribuídos gratuitamente na *internet*, e existe uma grande comunidade de usuários, o que facilita a resolução de problemas.

4.2 Leitura dos dados

O projeto depende de dois tipos de arquivos. O primeiro tipo são os arquivos CAPPI, relacionados com leituras de radar, apresentados em ASCII, ou seja, texto puro. Os arquivos de satélite são do tipo HDF4, que são distribuídos, por sua vez, em formato binário. Para tratar desses dados, foram implementadas duas classes distintas, *Matriz* e *fileHDF4*, descritas a seguir.

Matriz: usada para manipulação da imagem de radar do IPMet, incluindo imagens CAPPI.

fileHDF4: responsável pela manipulação dos dados em HDF4.

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 equivalem aos diagramas de classe UML dessas duas classes. O uso de diagramas UML foi adotado no presente texto apenas para ilustrar melhor essas classes, já que nem sempre são bem recomendados em sistemas de pequeno porte devido ao aumento de complexidade que podem introduzir na documentação e manutenção (SOMMERVILLE et al., 2003).

É importante notar que dada a natureza dos dados de HDF, a classe *fileHDF4* foi implementada com auxílio de *Templates* para a tipagem das matrizes de dados, sendo necessária uma instanciação para cada tipo de dado lido (no projeto, *INT16*, *INT32* e *DOUBLE*).

4.3 Associação de pixels

Computacionalmente, realizar essa associação da maneira descrita na sessão 3.1.5 – encontrar o *pixel* de satélite mais próximo de um dado *pixel* de radar – é uma tarefa dispendiosa, pois envolve comparar cada *pixel* de cada imagem.

A solução computacional escolhida baseia-se nas particularidades das duas imagens, sendo caracterizada por uma busca pelo mínimo local das distâncias baseado em uma solução inicial. O procedimento é mais bem descrito na Figura 4.3.

A condição inicial é obtida fazendo $S_0 \xleftarrow{\text{Associado}} R$, onde S_0 é o *pixel* de satélite já definido mais próximo, definido por $R_{a-1,b}$ ou $R_{a,b-1}$ nessa ordem; se o primeiro não existir, usa o segundo. Se nenhum dos dois existir, então é o primeiro *pixel* da imagem, e deve ser associado com o primeiro *pixel* da imagem de satélite.

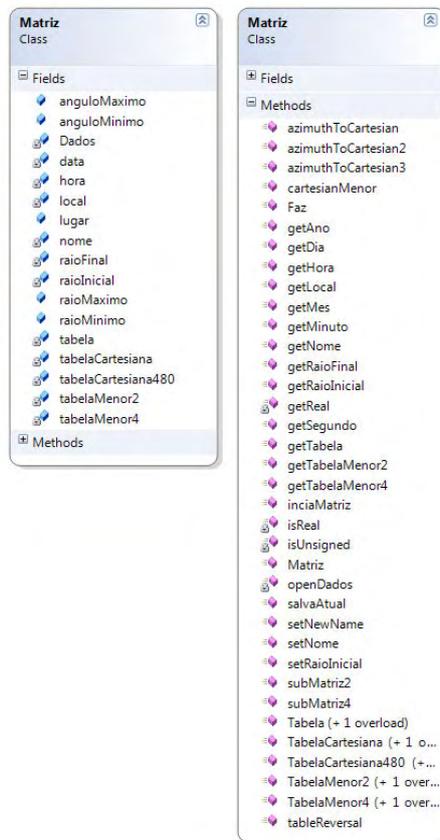


Figura 4.1 - Diagrama UML da classe *Matriz*

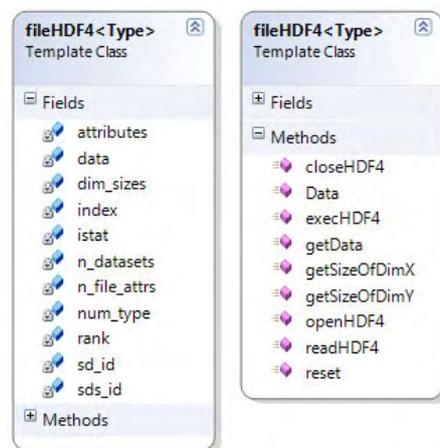


Figura 4.2 - Diagrama UML da classe *fileHDF4*

```

Dados:
 $R_{a,b}$  um pixel de radar;
 $S_{i,j}$  um pixel de satélite;
 $D \leftarrow \Delta R_{a,b}, S_{i,j}$  a distância (em km) entre centro desses pixels;
início
  Busca:
     $D_1 \leftarrow \Delta R_{a,b}, S_{i+1,j}$ ;
     $D_2 \leftarrow \Delta R_{a,b}, S_{i,j+1}$ ;
    se  $D > D_1$  então
       $D \leftarrow D_1$ ;
       $i \leftarrow i = i + 1$ ;
    fim
    senão se  $D > D_2$  então
       $D \leftarrow D_2$ ;
       $j \leftarrow j = j + 1$ ;
    fim
  senão
    Vai Para Busca;
  fim
   $S \xleftarrow{\text{Associado}} R$ ;
fim

```

Figura 4.3 - Algoritmo para associação

Devido as condições específicas do problema, o mínimo local encontrado por esse método também será o mínimo global para aquela *pixel*. Dada a estabilidade da posição dos *pixels*, espera-se que o laço de repetição seja executado uma única vez. Com isso, obtém-se o mínimo rapidamente, e as associações são realizadas com eficiência.

4.4 Implementação do filtro

A implementação do filtro é um dos principais pontos do trabalho aqui descrito, e seu diagrama UML pode ser observado na Figura 4.4.

O algoritmo foi adaptado utilizando facilidades disponíveis no C++, principalmente certas utilidades presentes na STL¹, um conjunto de ferramentas presentes no padrão C++ que inclui a implementação de algoritmos de busca, ordenação e outros tipos de manipulação de dados. O Algoritmo de Filtragem está descrito na Figura 4.5.

¹Standard Template Library

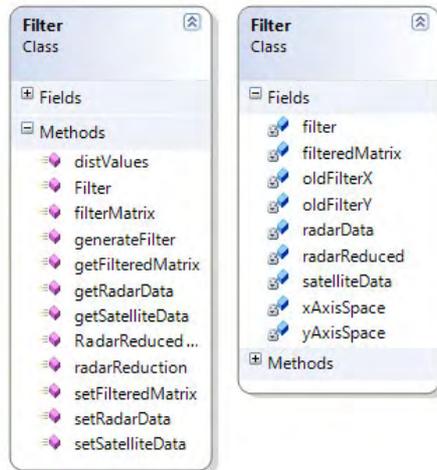


Figura 4.4 - Diagrama UML da classe *Filtro*

```

para cada  $I, J$  faça
  Resultado  $\leftarrow 0$ ;
  para cada  $i, j$  tal que  $(F[i, j] \in M[I, J])$  faça
    Soma  $\leftarrow$  Soma +  $Filtro_{I, J}(i, j) * F[i, j]$ ;
  fim
   $O[I, J] \leftarrow$  Resultado;
fim

```

Figura 4.5 - Algoritmo para filtragem

4.5 Parâmetros estatísticos

O Cálculo dos Parâmetros Estatísticos necessários para a validação do processo efetuado foram realizadas através da implementação de uma classe própria, *statistics*, cujo Diagrama UML pode ser acompanhado na Figura 4.6.

Enquanto os parâmetros P_4 , P_5 e P_6 são facilmente calculáveis (MEYER, 2000) e existe uma grande quantidade de pacotes já desenvolvidos para tanto, de forma que não serão abordadas aqui. O Parâmetro P_1 , por sua vez, necessita de uma descrição mais completa, posto que pode deve retornar não a distância em *pixels* do centro de massa das duas imagens, mas em quilômetros, o que é mais difícil. A descrição detalhada desse algoritmo é apresentada na Figura 4.5.

Após o cálculo do centro de massa de cada pixel, basta utilizar a Equação 3.4 para encontrar a distância em quilômetros entre os pontos.

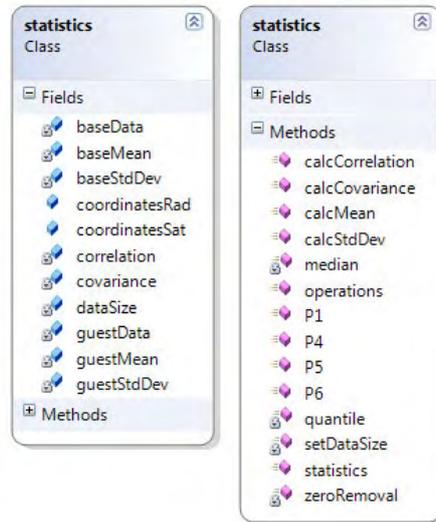


Figura 4.6 - Diagrama UML da classe *statistics*

Dados:

$P_{i,j}$ o nível de cinza do i, j -ésimo *pixel* da imagem P ;

$Lat_{i,j}$ a latitude do i, j -ésimo *pixel* da imagem P ;

$Lon_{i,j}$ a longitude do i, j -ésimo *pixel* da imagem P ;

início

$x \leftarrow 0$;

$y \leftarrow 0$;

$d \leftarrow 0$;

para cada i, j faça

$x \leftarrow x + P_{i,j} \times Lon_{i,j}$;

$y \leftarrow y + P_{i,j} \times Lat_{i,j}$;

$d \leftarrow d + P_{i,j}$;

fim

$x \leftarrow \frac{x}{d}$;

$y \leftarrow \frac{y}{d}$;

fim

Figura 4.7 - Algoritmo para cálculo do centro de uma imagem.

Tabela 4.1 - Máquinas utilizadas

Máquina	Processador	RAM	Video	HDD
PC_1	Athlon X2 6400+	4 GB	GeForce 8600GT	710 GB
PC_2	Athlon XP 1800+	1 GB	GeForce4 Ti4200	80 GB
PC_3	Athlon XP 3400+	256 MB	GeForceGo6150	40 GB
PC_4	Pentium III 700	128 MB	Intel i810	10 GB

4.6 Análise de desempenho

No trabalho de Calheiros e d'Oliveira (2007), o processo de filtragem levava vários dias. O cálculo de cada filtro era realizado individualmente, sendo necessária intervenção humana em cada parte do método. Conforme discutido até agora, esses passos foram automatizados.

Para que essa automatização seja valida, no entanto, é necessário descobrir qual é o esforço computacional necessário para o processo de filtragem. Foram utilizadas quatro máquinas com características diferentes para os testes de desempenho, descritas na Tabela 4.1.

Os testes foram realizados em três conjuntos de pares de imagens radar-satélite, conforme descrito abaixo:

Casos Reais: usam eventos reais de satélite e radar para cada teste. Pode ser considerado como padrão de comparação para os outros casos.

Casos Semi-Reais: usam imagens reais de satélite, ou seja, com as coordenadas e valores de pixels reais, mas as imagens de radar são geradas artificialmente. As coordenadas das imagens de radar são praticamente constantes em quaisquer imagens, além do tempo de processamento ser praticamente o mesmo para quaisquer valores nos tons de cinza dos pixels. Esse tipo de teste foi realizado apenas para possuir uma quantidade maior de casos para o cálculo.

Casos Artificiais: são casos criados totalmente por computador. Apesar das imagens de radar possuírem coordenadas normais, as imagens de satélite foram geradas de forma a possuírem variações geométricas extremas, como variação mínima (nula) ou máxima (variação considerável de resolução espacial

Tabela 4.2 - Tempo médio de execução da filtragem

Máquina	Casos Reais	Casos Semi-Reais	Casos Artificiais
PC_1	1302 ms	1204 ms	1296 ms
PC_2	2593 ms	2630 ms	2537 ms
PC_3	1634 ms	1424 ms	1450 ms
PC_4	5150 ms	5843 ms	5756 ms

em cada pixel). Esse teste foi realizado para medir a eficiência do algoritmo nos casos limite, mesmo que esses não venham a ocorrer em casos reais, a fim de validar o método para outros usos.

O uso de casos não reais nos testes foi adotado a fim de testar o software para um número artificialmente grande de casos, incluindo os casos de limite. Como esses casos não seriam encontrados naturalmente, foram introduzidos no teste apenas para assegurar o funcionamento do processo de filtragem e ter base melhor para o cálculo de seu desempenho. A Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos pelos testes em cada uma das máquinas.

É possível notar que em o processamento das imagens leva cerca de 1 segundo em uma máquina no estado da arte (em 2009), o que é um tempo aceitável para eventos individuais. Mesmo no pior dos casos, em uma máquina antiga, o tempo de processamento de pouco mais de 5 segundos ainda é perfeitamente aceitável. Dessa forma, é possível concluir que os resultados são gerados em um intervalo de tempo aceitável.

Além disso, testando matrizes de tamanho diferente, foi possível inferir que o algoritmo tem complexidade de aproximadamente $O(n)$ ao se aumentar o número de pixels da imagem de radar, isto é, para cada novo pixel espera-se que o tempo de processamento aumente linearmente. No caso das imagens de satélite, ocorreu um efeito bastante curioso e contra-intuitivo: quanto maior a imagem de satélite, *menor* é o tempo de processamento, numa ordem de aproximadamente $O(n^2)$. Isso se deve por que o dimensão de cada filtro é relacionado com a diferença de resolução espacial dos pixels de radar e satélite; quanto menos pixels na imagem de satélite, maior essa diferença, e maior a dimensão do filtro. Na Sessão 3.1.6 existe uma discussão mais completa sobre esse procedimento.



Figura 4.8 - Composição 3D sem distorção e em alta resolução espacial.

4.7 Qualidade da filtragem

Um conjunto de cenas 3D foi composto e cada cena foi renderizada duas vezes, com condições diferentes. Na primeira renderização, criou-se um conjunto de imagens de alta resolução espacial e sem distorção, que equivalem analogamente as imagens de radar. No segundo conjunto de imagens renderizadas, a resolução espacial era bem mais baixa e foi introduzido um efeito de distorção não linear, de forma a simular as imagens de satélite.

As coordenadas do centro de cada um desses pixels são conhecidas, de forma a possibilitar a aplicação do filtro sem dificuldades. O uso dessas imagens foi escolhido apenas para validar o filtro e sua qualidade. Um exemplo de uma dessas cenas está na Figura 4.8.

Foram comparados 5 métodos a fim de avaliar o desempenho do método proposto por Calheiros e d'Oliveira (2007), incluindo o próprio. O método de Remapeamento descrito na Sessão 3.1.7 também foi avaliado como um método isolado, sem o uso de da filtragem descrita, a fim de se qualificar sua influência no método descrito no trabalho. Os outros métodos foram os de redução de redução bi-cúbica, bi-linear e do vizinho mais próximo, que são métodos mais tradicionais utilizados para redução da resolução espacial de imagens. Os resultados para uma das imagens de composição 3D podem ser visualizados na Figura 4.9, apenas como exemplo.

De acordo com a Tabela 4.3, o método proposto por Calheiros e d'Oliveira (2007) obteve os melhores resultados nos quatro parâmetros propostos por Mecklenburg et

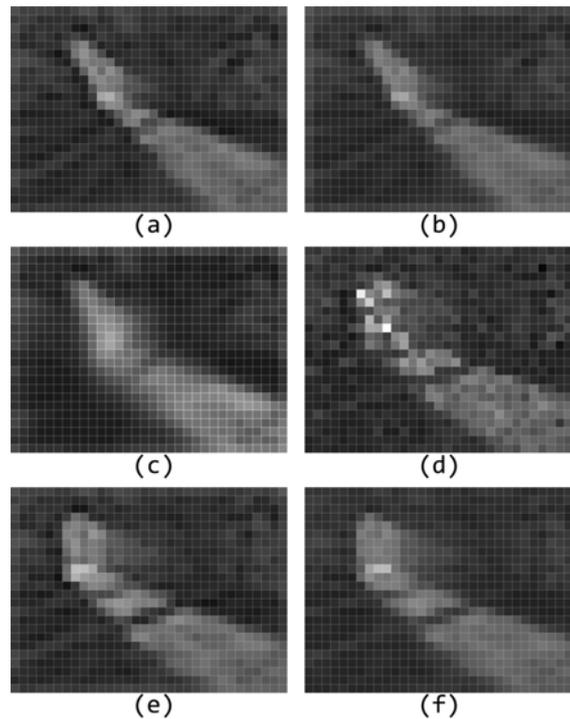


Figura 4.9 - a) Imagem modelo original; b) Calheiros e d'Oliveira (2007); c) Remapeamento; d) Vizinho mais Próximo; e) Bi-cúbica; f) Bi-linear

Tabela 4.3 - Resultados comparativos

Método Utilizado	P_1	P_4	P_5	P_6
Calheiros e d'Oliveira (2007)	0.0132	87.18	93.11	0.97
Remapeamento Ponderado	0.1862	42.41	91.11	0.76
Vizinho mais Próximo	2.3238	22.54	45.02	0.56
Bi-cúbico	0.7821	74.41	84.12	0.81
Bi-linear	1.8421	51.42	48.70	0.74

al. (2000). Isso demonstra que a distorção geométrica das imagens pode influenciar fortemente no processo de redução de resolução espacial.

Tanto o método implementado no presente trabalho quanto sua versão não filtrada, o remapeamento ponderado, fazem parte do software desenvolvido em C++. Os demais métodos foram aplicações das implementações presentes no GNU Octave. Como tratam-se de dois softwares distintos, seria injusto comparar o desempenho computacional de ambos. Por outro lado, é interessante comparar os desempenhos dos métodos presentes no *software* desenvolvido. Na segunda linha da

Tabela 4.2: tempo comparativo existe a comparação do tempo de processamento apenas do método completo e do remapeamento, em milissegundos, para os testes referentes à Qualidade de Filtragem, enquanto as demais linhas se referem ao teste descrito na Tabela 4.2. É fácil observar que o remapeamento é em média 15 vezes mais rápido em todos os casos aqui estudados (e quase 30 vezes para o melhor caso).

Tabela 4.4 - Tempo de processamento comparativo

Caso	Método Completo (ms)	Remapeamento (ms)
Qualidade de Filtragem	1232	34
Casos Reais	1302	36
Casos Semi-Reais	1204	218
Casos Artificiais	1296	36

O método bi-cúbico obteve um resultado bem interessante, seguido pelo método bi-linear, mas a distorção geométrica ainda teve grande influência em ambos os casos. No geral, no entanto, esses dois métodos são mais rápidos que o de Calheiros e d'Oliveira (2007), e deveriam ser considerados em situações onde a precisão é menos importante que o tempo de processamento.

Usando apenas o remapeamento conforme proposto no mesmo método, foi obtido um resultado bastante significativo, principalmente se comparado ao desempenho do método do vizinho mais próximo. É importante notar que esses dois métodos mais simples são bastante semelhantes, além de serem computacionalmente menos custosos se comparados com os outros métodos utilizados.

A análise dos resultados comparativos apresentados mostra que o desempenho do método proposto por Calheiros e d'Oliveira (2007) é superior ao uso isolado do remapeamento ponderado (que não utiliza a filtragem gaussiana). Entretanto, o remapeamento ponderado obteve bons resultados, o que reafirma sua importância como etapa inicial do método de Calheiros e d'Oliveira (2007). Além disso, para as imagens com o tipo de distorção estudadas nesse trabalho, o desempenho do remapeamento ponderado é superior ao dos métodos de vizinho mais próximo, bi-cúbico e bi-linear.

É importante ter-se em mente que apesar de o processamento de um único evento ser lento em relação a outros métodos, ele leva apenas 1 segundo, o que pode ser

considerado um valor desprezível para o estudo de quantidades relativamente pequenas de eventos. Esse tempo só passa a se tornar um problema no estudo de milhares de eventos de uma única vez. No entanto, dada a natureza dos eventos estudados e a dificuldade de se conseguir dados comparáveis de ambos os instrumentos no caso estudado, é pouco provável que seja necessário processar quantidades tão grandes em um futuro próximo.

5 DEMONSTRAÇÃO E TESTES

A implementação de um *software* que automatizasse o método proposto por Calheiros e d'Oliveira (2007) foi um importante fator motivador para o presente trabalho. Nos Capítulos anteriores, esse método foi descrito a fundo e os detalhes de sua implementação foram apresentados em detalhes.

O produto final foi batizado como *Radar-Satellite Image Analysis System* (RSIAS), e o presente Capítulo apresenta uma demonstração aprofundada desse *software* desenvolvido, incluindo detalhes de sua interface e dos sub-produtos por ele gerados.

O Capítulo também inclui uma demonstração das capacidades do *software* aplicado no caso estudado para um conjunto de 8 eventos, a fim de validar sua aplicabilidade e demonstrar suas capacidades em exemplos reais.

5.1 Interface

A interface foi implementada com o auxílio da API OpenGL e do GLUT. Sua principal intenção é dar ao usuário uma visualização rápida dos dados com que está trabalhando.

É possível ao usuário observar cada um dos tipos de dado, radar e satélite, em vários estágios de processamento. Essa função possui como objetivo a capacidade de permitir que o usuário possa acompanhar visualmente os passos de processamento, além de permitir um grau de customização em relação aos tipos de dados mostrados, e a forma que são exibidos.

Para que a visualização seja útil para pesquisadores da área, existe ainda um *colorbar*, ou seja, uma barra com a escala de cores utilizada na imagem. Esse *colorbar* não está presente nas imagens das Sub-sessões 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3, já que nenhuma dessas imagens tem por objetivo ser analisada numericamente. Ele está presente, no entanto, na Sub-sessão 5.1.4.

No *software* implementando, os dados exibidos e a barra de informações estão em janelas distintas. A Figura 5.1 demonstra como é exibido ao usuário.

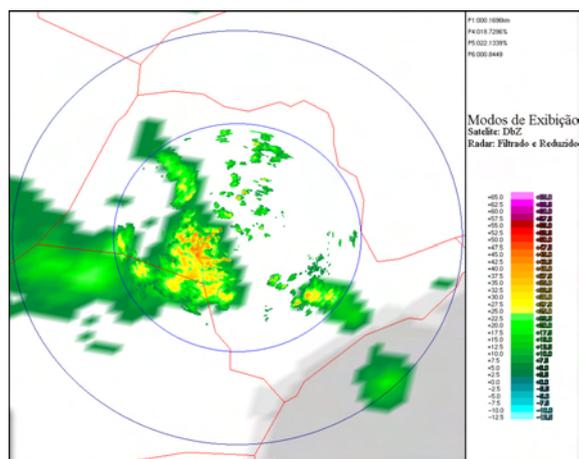


Figura 5.1 - Tela básica do *software*

5.1.1 Visualizações de radar

Existem três formas de visualizar as imagens de radar previamente obtidas através de um arquivo CAPPI.

A primeira dessas formas é visualizar os dados CAPPI da forma original, ou seja, utilizando as coordenadas geográficas de cada um dos pontos da matriz CAPPI para projetar o valor de cada um dos pixels. Isso pode ser observado na Figura 5.2.

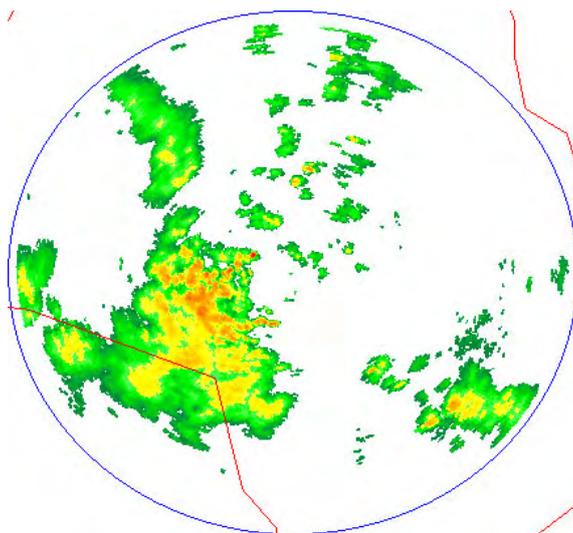


Figura 5.2 - Imagem de radar com CAPPI original

Outra forma de observar as imagens de radar é utilizando um *snapshot* do processo de filtragem, ou seja, a imagem de radar já filtrada, mas ainda em alta resolução espacial. Esse tipo de visualização é bastante útil para se compreender de que forma o processo de filtragem afetou as características da imagem. A Figura 5.3 é um exemplo desse tipo de visualização.

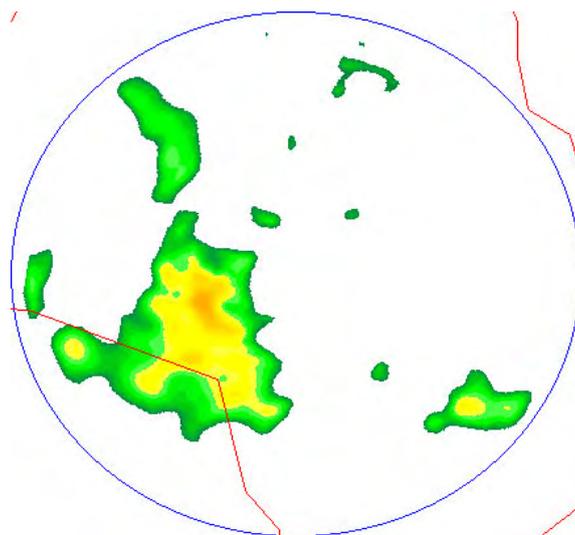


Figura 5.3 - Imagem de radar pós-filtragem

O terceiro modo de visualizar as imagens de radar é o produto final do procedimento de ajuste de resolução espacial. Trata-se de uma imagem com a mesma resolução espacial e com mesma distorção geométrica da imagem de satélite. Um exemplo é apresentado na Figura 5.4.

5.1.2 Visualizações de satélite

Assim como as imagens de radar, existem três visualizações possíveis para as imagens de satélite.

A primeira visualização implementada são os dados simples de satélite, utilizando a latitude e a longitude para posicionar cada pixel na imagem gerada. Utilizam-se tons de cinza de forma que quanto maior a temperatura, mais próximo do branco é a cor do pixel, conforme mostra a Figura 5.5.

De forma alternativa, o usuário pode visualizar a temperatura com os tons de brilho

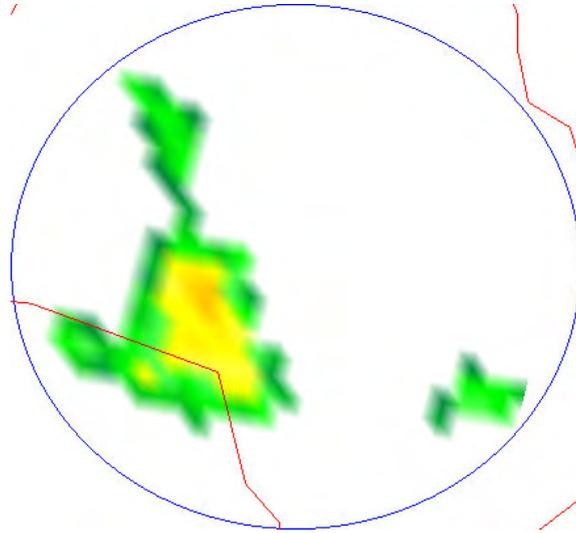


Figura 5.4 - Imagem de radar final, pós-processamento

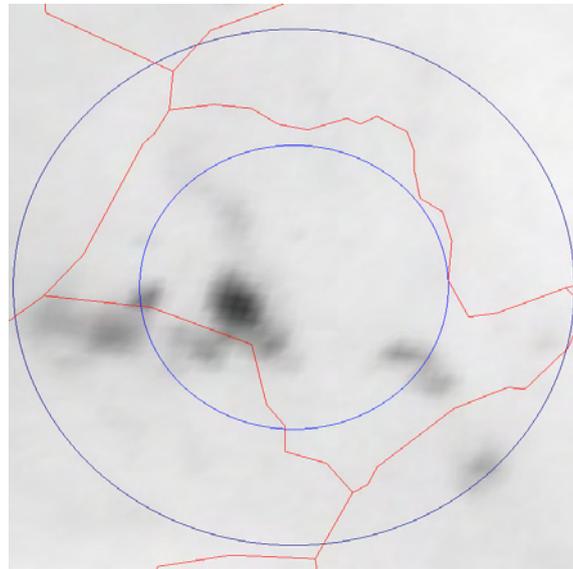


Figura 5.5 - Imagem de satélite em tons de cinza

espalhados de forma oposta, ou seja, quanto maior a temperatura, mais próximo ao preto é o pixel. A Figura 5.6 mostra a mesma imagem da Figura 5.5, mas utilizando esse padrão invertido.

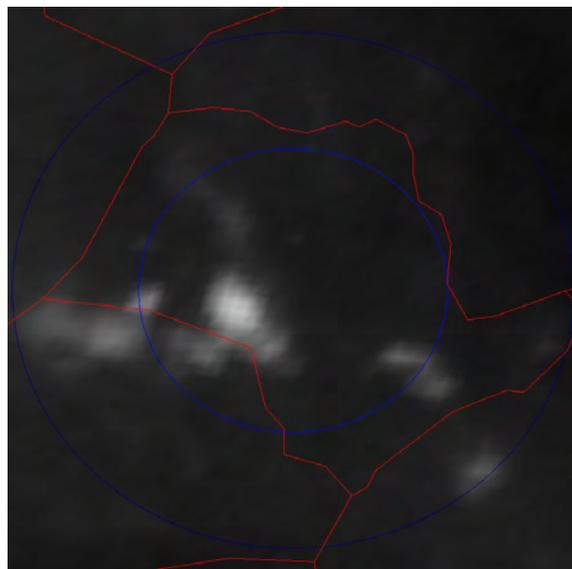


Figura 5.6 - Imagem de satélite em tons de cinza invertidos

Por fim, a interface do *software* também possui uma implementação que permite a visualização das imagens de satélite pós-transformada de unidades, ou seja, ao invés da temperatura, os dados exibidos são em dBZ. Utilizando a mesma escala de cores das imagens de radar, pode-se observar o resultado na Figura 5.7.

5.1.3 Visualizações conjuntas

A fim de facilitar a visualização conjunta dos dados por parte do usuário, a interface foi implementada de forma que seja possível exibir qualquer visualização de radar conjuntamente com qualquer visualização de satélite.

Um exemplo comum disso é o uso das imagens de radar e satélite de maneira sobreposta, conforme a Figura 5.8. Esse tipo de composição permite estudar visualmente as diferenças e semelhanças das duas imagens.

É possível também isolar a área representada pela imagem de radar da imagem de satélite, ou seja, exibir os dados de satélite que estejam mais 240 km distantes da

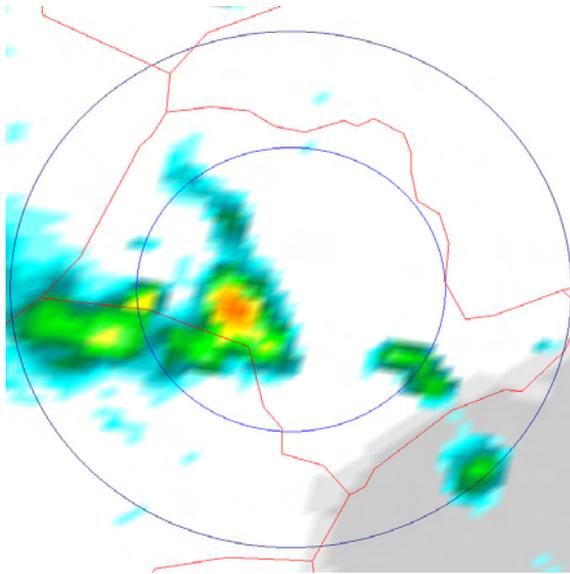


Figura 5.7 - Imagem de satélite em dBZ

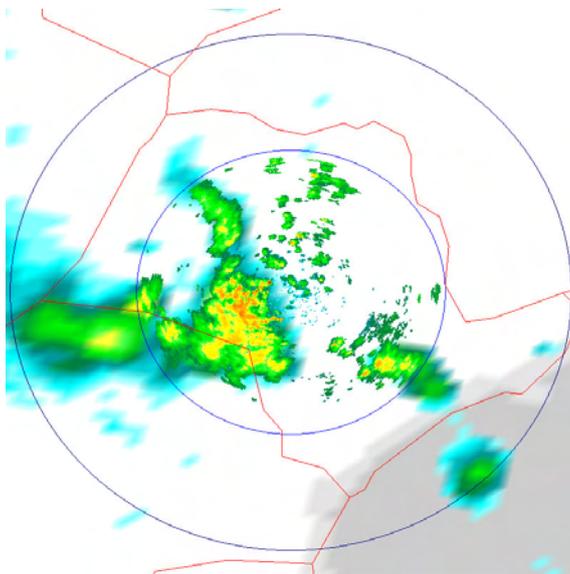


Figura 5.8 - Composição com ambas as imagens

posição do radar, e então exibir a imagem de radar no restante da imagem. Dessa forma, o usuário pode estudar visualmente um evento que se estenda além da área do radar usando, por exemplo, dados mais precisos onde for possível. A Figura 5.9 ilustra esse exemplo.

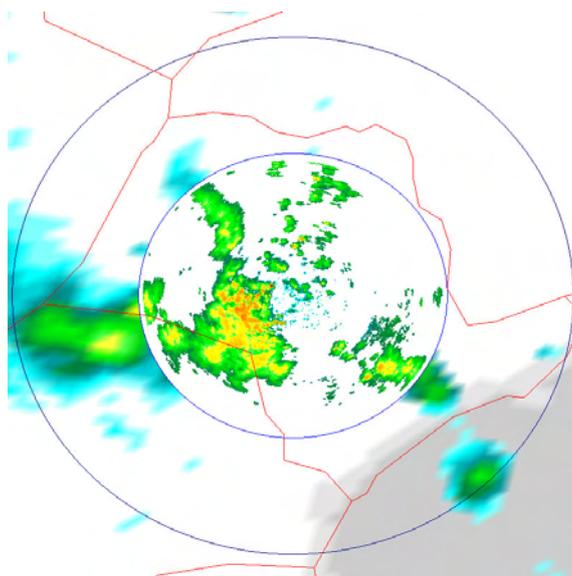


Figura 5.9 - Composição com radar e satélite, com satélite após 240 km de distância do radar

Outro caso implementado é justamente o contrário em relação à imagem de satélite, exibindo dela apenas a região situada a menos de 240 km do radar. Dessa forma pode-se, por exemplo, comparar visualmente a imagem de radar já processada e a de satélite. Esse tipo de imagem pode ser visto na Figura 5.10.

5.1.4 Barra lateral

Uma barra de informações adicionais foi criada para apresentar vários dados que podem ser interessantes para que o usuário possa estudar visualmente as imagens processadas. A Figura 5.11 ilustra esse exemplo.

Existe uma *colorbar* listando o valor em dBZ ou kelvin das cores e tons de cinza que aparecem na imagem, de forma que o usuário possa facilmente identificar os valores presentes em uma dada região.

Os quatro parâmetros estatísticos utilizados para a análise da similaridade das ima-

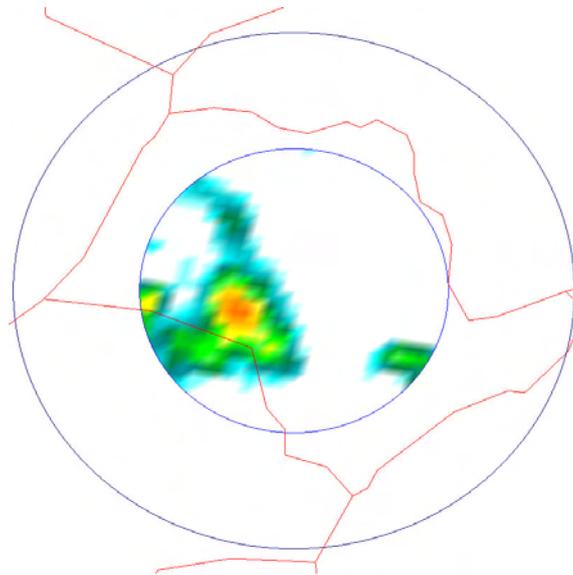


Figura 5.10 - Imagem de satélite apenas na região até 240 km do radar

P1: 000.0263 km
 P4: 089.4523 %
 P5: 131.9663 %
 P6: 000.8172

Modos de Exibição
 Satelite: DbZ
 Radar: Filtrado e Reduzido



Figura 5.11 - Barra de informações

gens são mostrados nessa barra de informações, permitindo que o usuário tenha acesso rápido aos seus valores.

Por fim, também são listados quais os modos de exibição de cada imagem, satélite e radar, de forma que seja fácil para o usuário saber qual o atual estado do *software*.

5.2 Testes

Uma discussão inicial em relação aos testes relacionados com o desempenho do *software* foi previamente apresentada na Sessão 4.6. No entanto, é necessário observar o funcionamento do procedimento em exemplos reais.

No presente trabalho foram utilizados oito imagens pré-selecionadas de eventos interessantes para o caso de estudo de Calheiros e d'Oliveira (2007). A Tabela 5.1 lista os oito eventos, E_1 até E_8 , e o momento em que ocorreram. Todas as imagens de radar nesses exemplos estão centradas na latitude $22^{\circ}21'30''S$ e longitude $49^{\circ}1'42''W$, correspondente ao radar de Bauru.

Tabela 5.1 - Momento de ocorrência de cada Evento

Evento	Data	Hora (GMT-3)
E_1	03/02/07	01:46
E_2	03/02/07	14:23
E_3	05/02/07	14:01
E_4	06/02/07	13:53
E_5	21/02/07	02:01
E_6	25/02/07	13:01
E_7	25/02/07	14:01
E_8	16/03/07	01:31

Além disso, é interessante apontar onde estava o satélite em cada um desses eventos, para que seja possível ter uma ideia da influencia de sua orbita em relação a qualidade das imagens. A Figura 5.12 aponta a rota do satélite em cada um dos oito eventos.

5.2.1 Resultados

As Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 mostram os resultados do *software* para os eventos estudados.

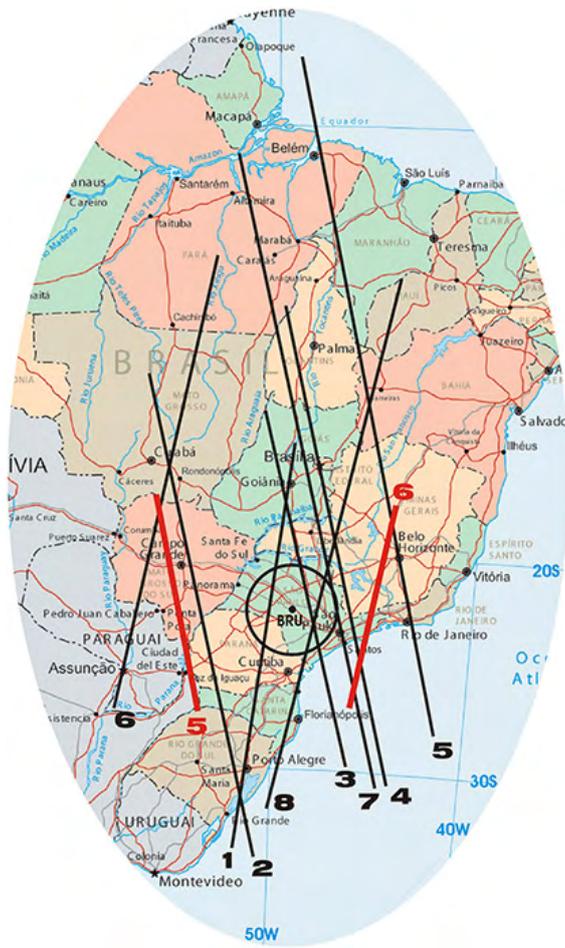


Figura 5.12 - Posição do satélite em cada um dos eventos estudados.
 Fonte: Calheiros e d'Oliveira (2007)

Essas figuras são organizadas da seguinte forma: a imagem superior a esquerda equivale à imagem de radar não processada. A superior direita é a imagem de satélite não processada, com seus dados em kelvin. A imagem central esquerda apresenta os dados de radar já filtrados, mas ainda em alta resolução espacial. A imagem inferior esquerda apresenta a imagem de radar após todo o processamento, já filtrada e remapeada para a mesma resolução espacial da imagem de satélite. A imagem inferior direita é a imagem de satélite após a aplicação de uma relação $T_b - Z$, de forma que seus pixels representam quantias em dBZ. A imagem ainda apresenta no centro à direita uma escala em quilômetros. Ajuste de unidades da imagem de satélite foi realizado utilizando a relação R_3 da Tabela 3.1.

A Figura 5.13 possui um efeito interessante cujo efeito é observável ao se comparar as duas imagens inferiores, com a figura da esquerda parecendo apontar uma quantidade maior de precipitação que a da direita. As chuvas fortes causam um efeito de atenuação sobre os dados dos pixels posteriores, reduzindo a precisão desses valores. O satélite não sofre esse efeito, e a imagem resultante é levemente diferente. Apesar disso, ainda é possível observar algumas características do evento que são comuns às duas imagens.

A Figura 5.14 apresenta um evento com vários focos menores de precipitação, mas que são intensos. A filtragem produz um resultado bastante satisfatório, mas devido à diferença da resolução espacial em relação a imagem de satélite, o remapeamento acaba fazendo com que se percam alguns detalhes do evento.

Na Figura 5.15 existe uma grande quantidade de focos de pequenos e intensos, mas a maior parte deles é menor que os pixels de satélite. No entanto, a grande intensidade desses pontos faz com que, durante o processo de filtragem e remapeamento, alguns deles se tornem pixels de menor intensidade, mas ainda visíveis.

Novamente existe o efeito dos vários focos pouco extensos e bastante intensos na Figura 5.15. O efeito de atenuação dos valores reais está presente na imagem de radar mas, apesar das complicações, ambas as figuras resultantes são bastante parecidas.

No evento apresentado na Figura 5.17 existe uma grande quantidade de formações de dimensão reduzida e com baixa intensidade. No processo de filtragem e remapeamento, a maioria desses pontos acaba desaparecendo, e as imagens resultantes possuem características razoavelmente semelhantes.

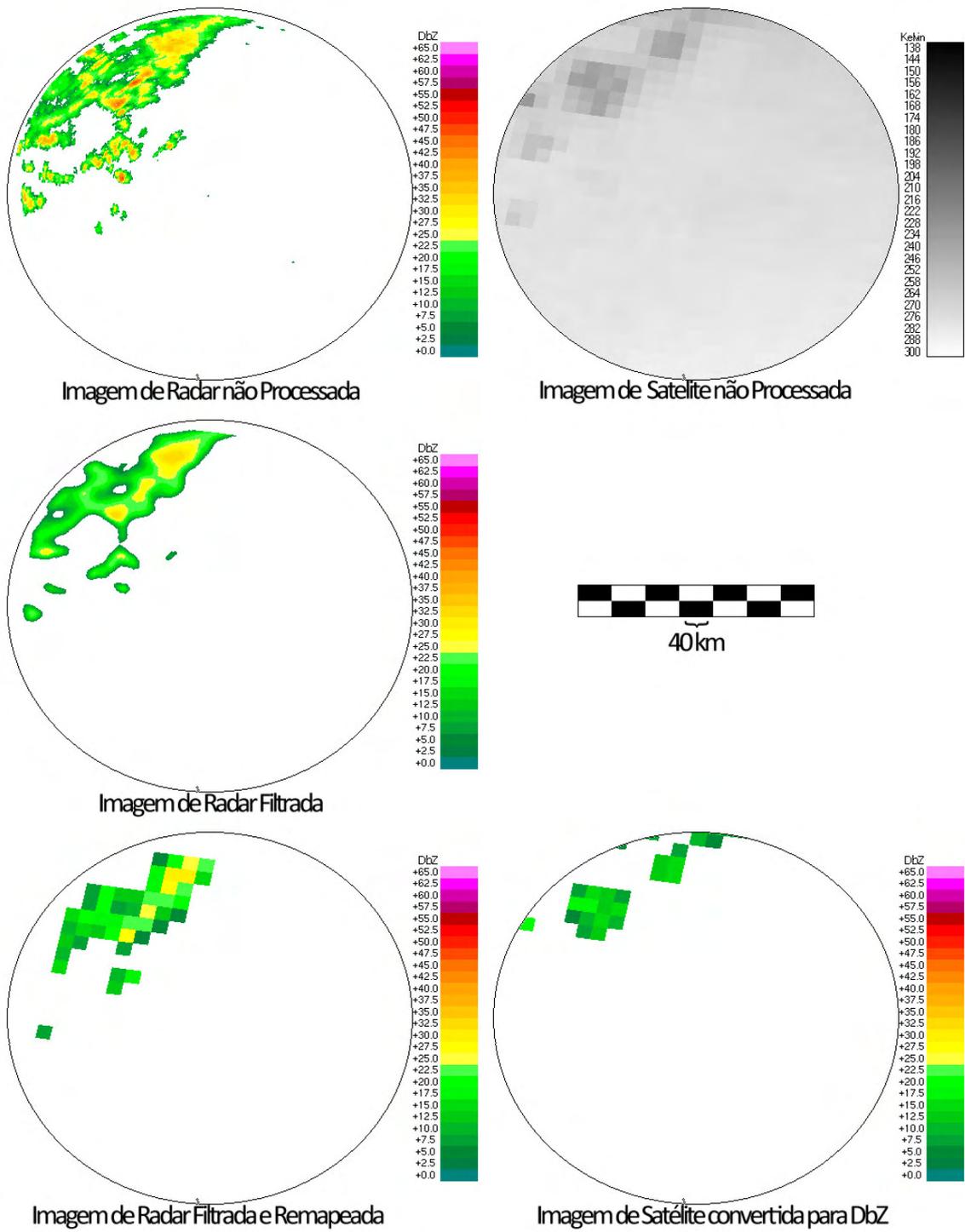


Figura 5.13 - Resultados para o Evento 1

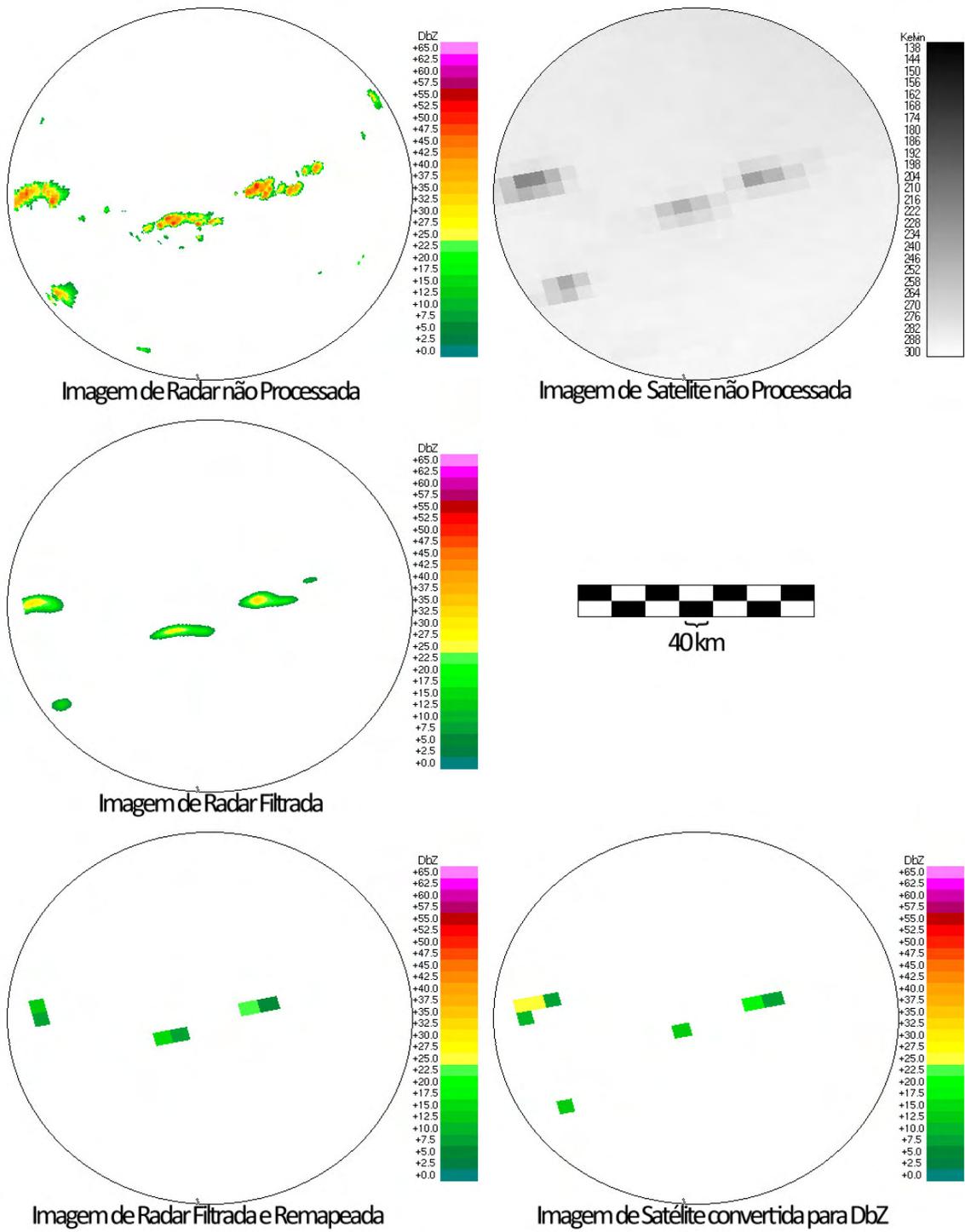


Figura 5.14 - Resultados para o Evento 2

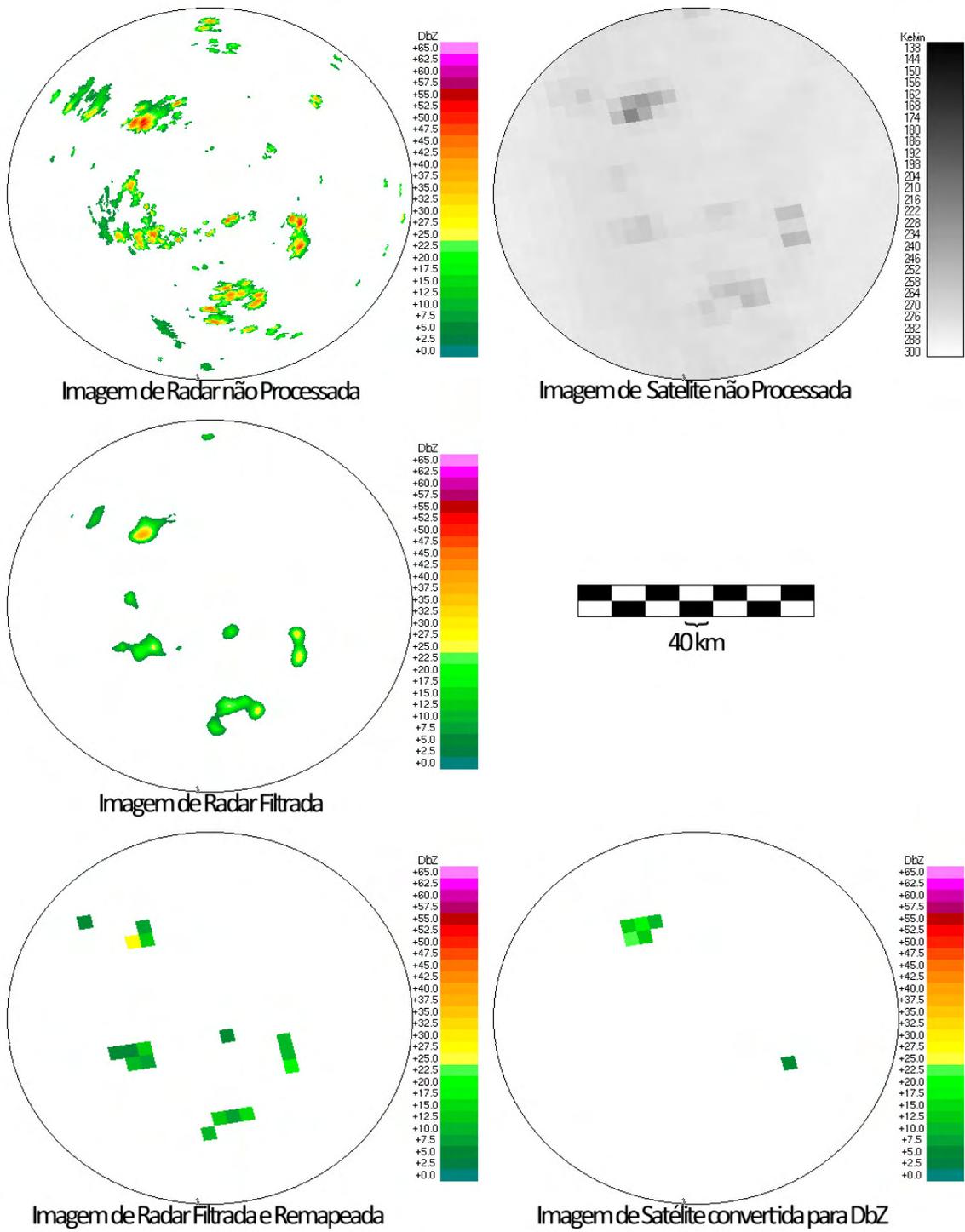


Figura 5.15 - Resultados para o Evento 3

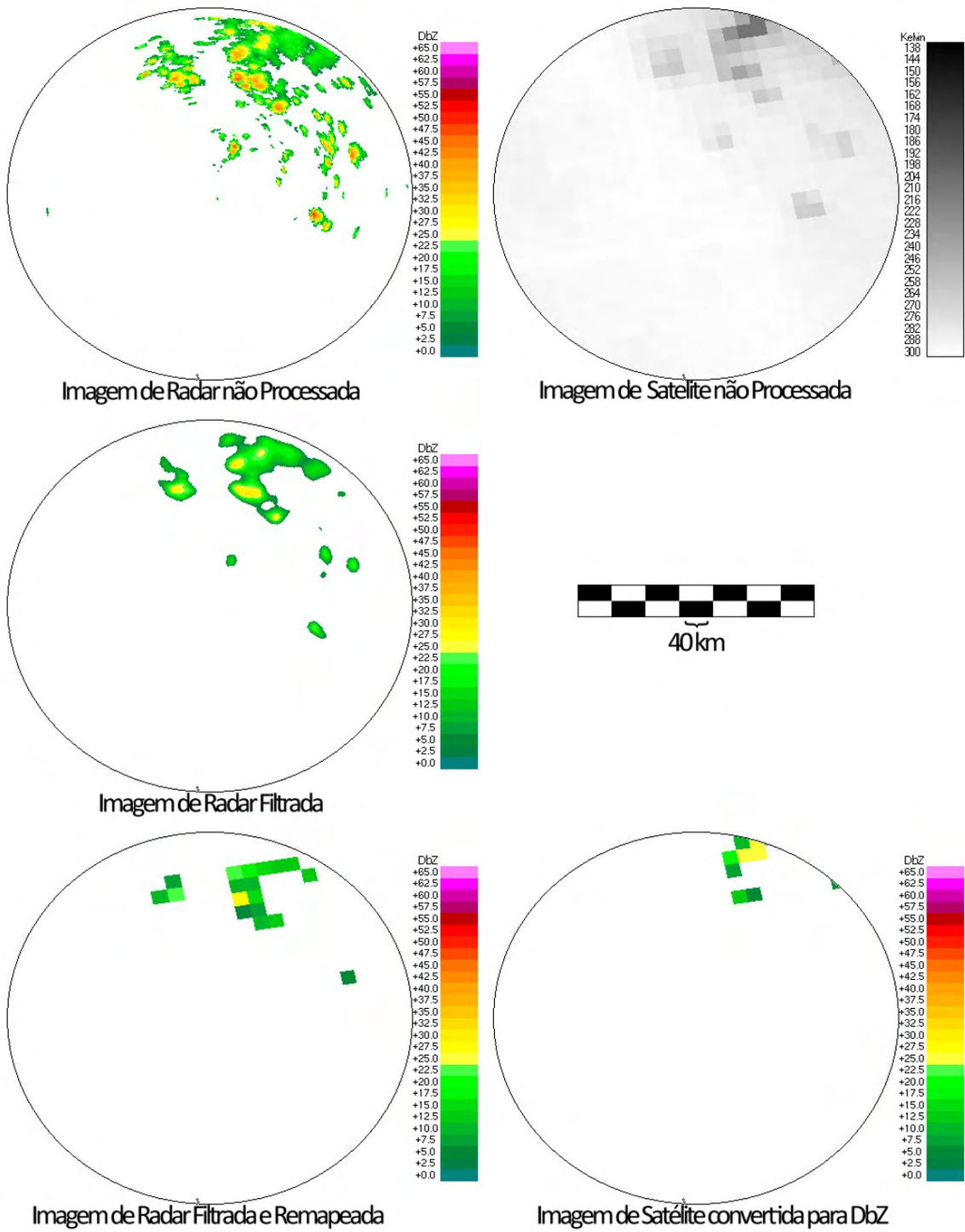


Figura 5.16 - Resultados para o Evento 4

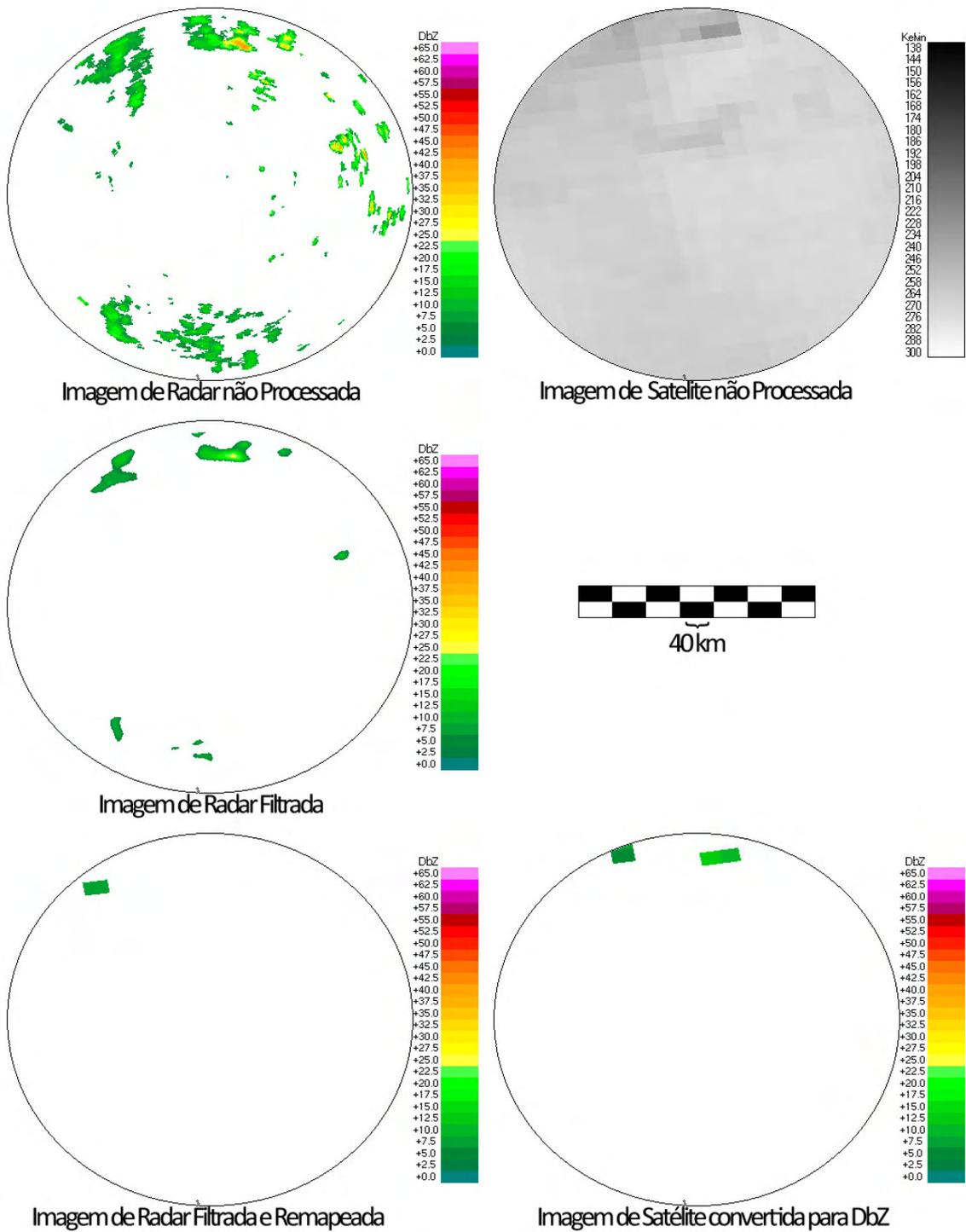


Figura 5.17 - Resultados para o Evento 5

O Evento da Figura 5.18 apresenta uma imagem de satélite próxima à borda do instrumento, com pixels visivelmente grandes. O processo de filtragem acaba zerando os valores dos pixels nas bordas da imagem de radar, que nesse caso acaba fazendo com que uma porção significativa da imagem (presente na imagem não processada) acabe por desaparecer. Apesar disso, a parte da imagem de radar à esquerda, onde os pixels de satélite apresentam resolução espacial maior, são mais precisas, e é possível encontrar correlação visual entre as duas imagens nessa região. Isso demonstra o efeito que a resolução espacial dos pixels de satélite possuem sobre a imagem final.

Em contraste, na Figura 5.19 a imagem de satélite possui uma resolução espacial média maior, fazendo com que os a imagem processada mantenha mais características em comum com a imagem original de radar. No entanto, a presença de varias ocorrências pontuais de baixa intensidade ainda resulta no desaparecimento de muitos pontos após o processo de filtragem e remapeamento.

Mais uma vez o efeito de atenuação e os focos pouco extensos e de baixa intensidade fazem com que as imagens de satélite e radar processadas não sejam exatamente iguais na Figura 5.20. Mesmo assim, a resolução espacial relativamente alta dos pixels de satélite faz com que as características principais do evento se mantenham.

Além disso, os valores de cada uma das variáveis estatísticas para os oito eventos estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados estatísticos para cada evento

Evento	P_1	P_4	P_5	P_6
E_1	0.1475	64.28	92.54	0.61
E_2	0.0108	77.07	62.57	0.78
E_3	0.0179	87.40	84.82	0.60
E_4	0.0699	99.02	53.88	0.47
E_5	0.0020	74.39	79.37	0.86
E_6	0.1568	80.16	67.91	0.68
E_7	0.0207	70.97	88.41	0.58
E_8	0.0263	89.45	75.78	0.82

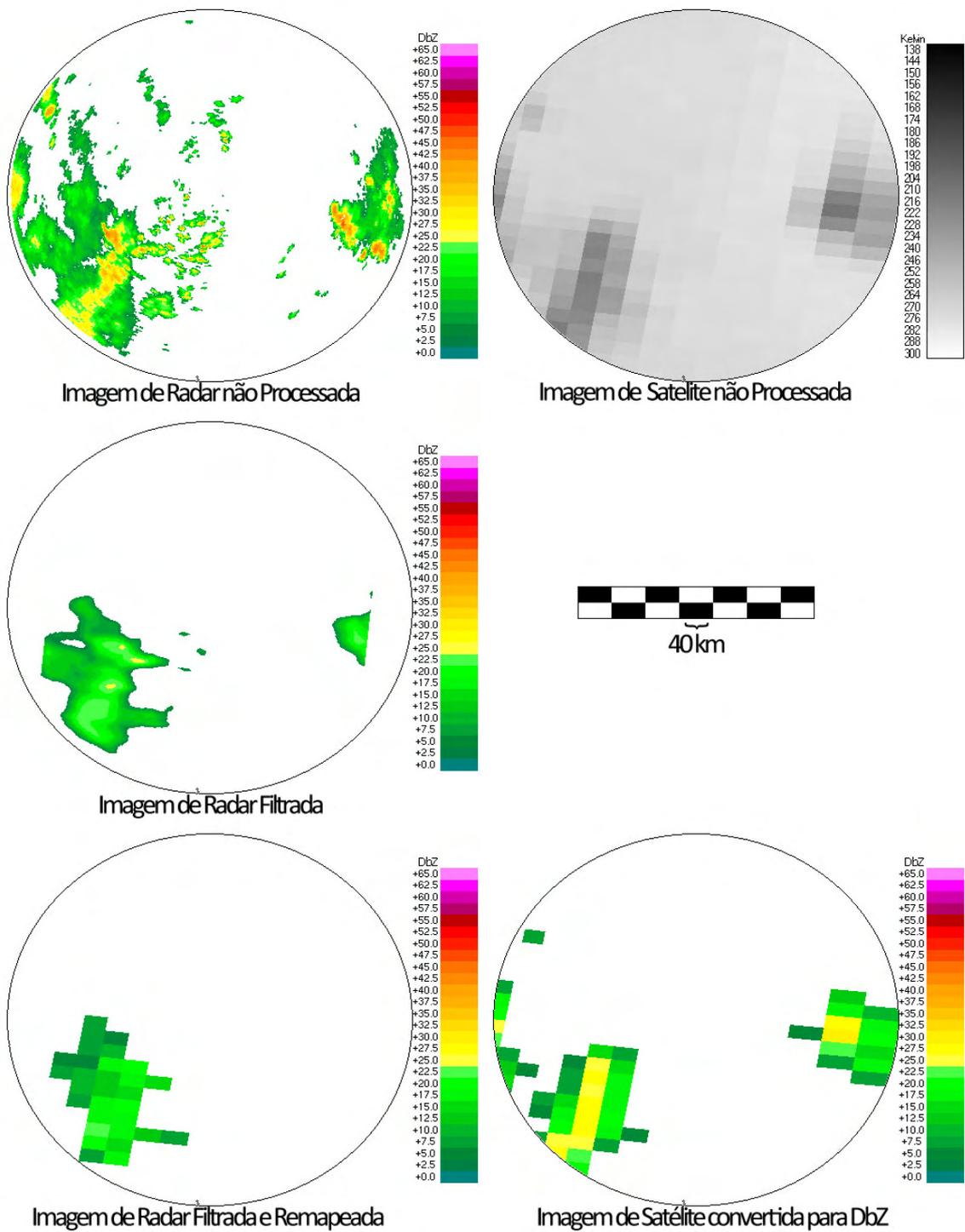


Figura 5.18 - Resultados para o Evento 6

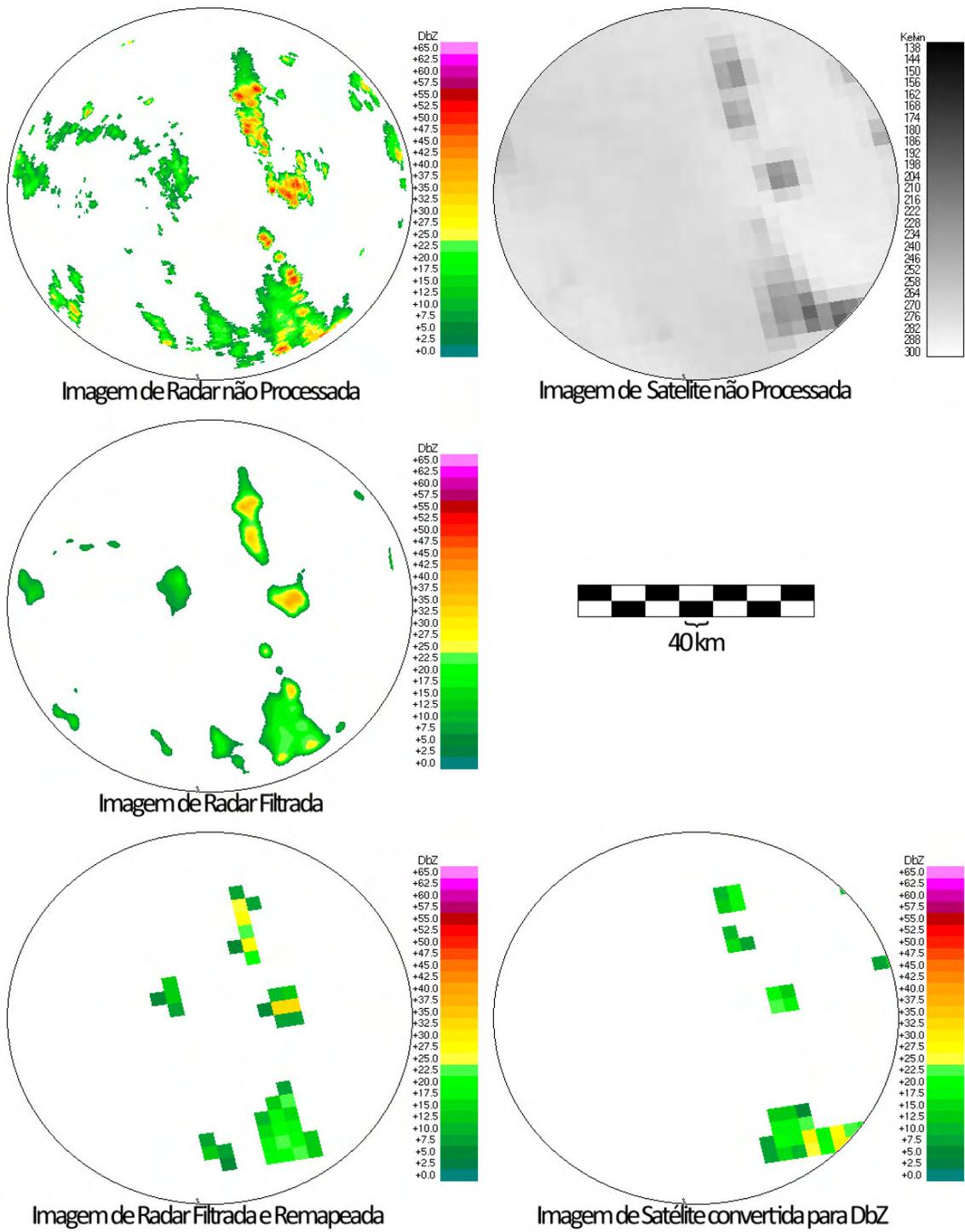


Figura 5.19 - Resultados para o Evento 7

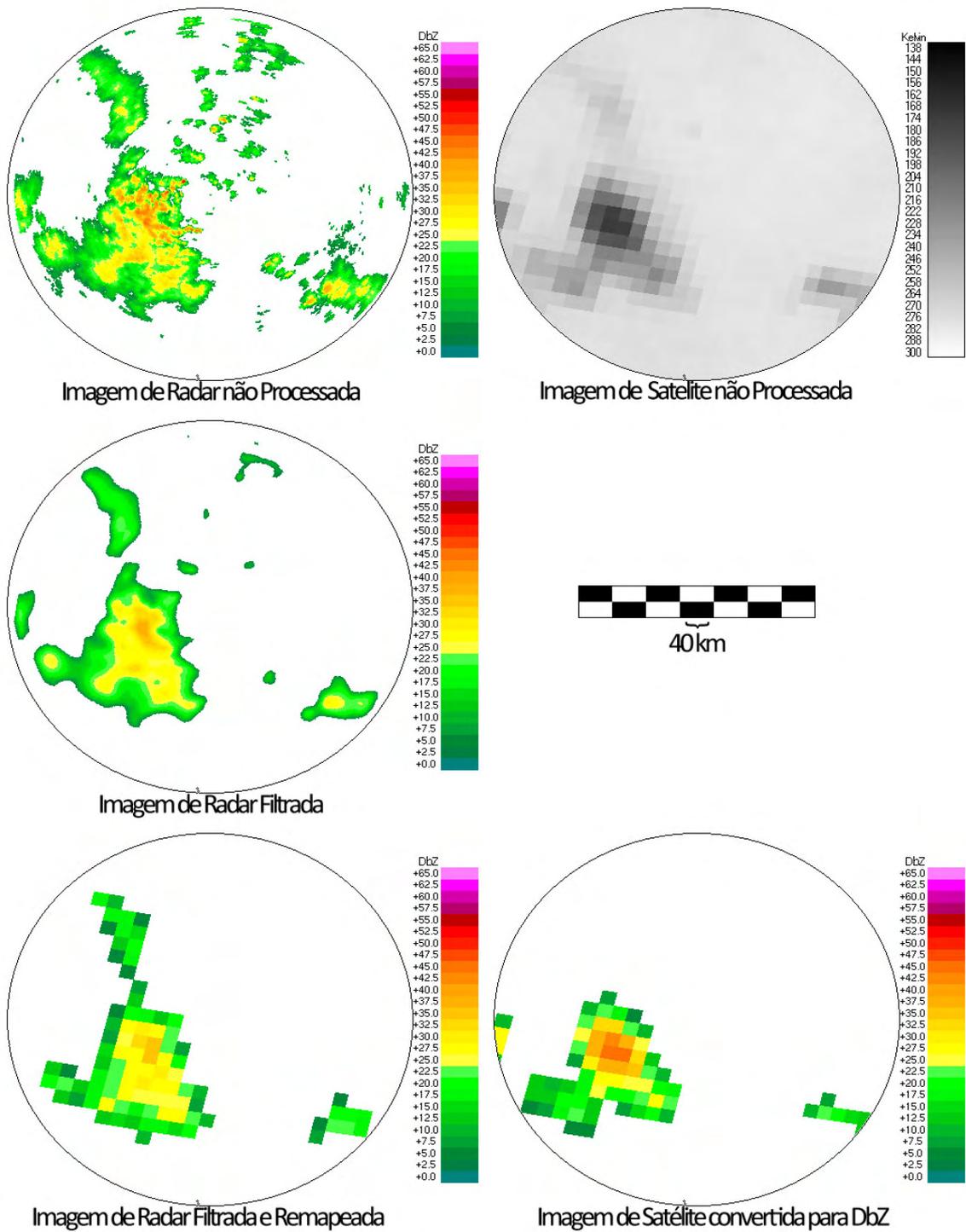


Figura 5.20 - Resultados para o Evento 8

5.2.1.1 Economia de tempo do processo semi-automatizado em relação ao processo manual

No trabalho de Calheiros e d'Oliveira (2007) cada um dos eventos levava vários dias para ser processado, posto que a maior parte dos passos era estritamente artesanal. Cabia ao pesquisador encontrar as relações de distância e calcular manualmente cada um dos filtros, o que abria espaço para falha humana.

Seria impraticável calcular um grande número de eventos utilizando um método não automatizado. Ao mesmo tempo, é importante que exista um grande número de eventos processados a fim de dar força ao método e gerar material de estudo para novas pesquisas.

A Tabela 5.3 contém o tempo médio necessário para o processamento de cada uma das imagens utilizando a máquina PC_1 da Tabela 4.1, tanto para o processo total de filtragem e remapeamento como também para apenas o processo de remapeamento. Os valores para os parâmetros obtidos apenas com o remapeamento é normalmente inferior, conforme pode ser observado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tempo de processamento

Evento	Tempo Total (ms)	Apenas Remapeamento (ms)
E_1	1083	239
E_2	1748	32
E_3	1028	36
E_4	1010	36
E_5	1110	35
E_6	1501	214
E_7	1037	35
E_8	1273	233

É fácil notar que esse tempo é imensamente menor que os vários dias necessários para o procedimento manual, e que ainda permitem a aplicação do método em um grande número de eventos em um período relativamente curto. Ainda sim, existe a possibilidade de sacrificar razoavelmente a qualidade do procedimento, evitando a filtragem que é maior consumidora de tempo, e obter um resultado que ainda pode ser útil para alguns casos.

Tabela 5.4 - Resultados estatísticos para cada evento usando apenas remapeamento ponderado.

Evento	P_1	P_4	P_5	P_6
E_1	0.1867	63.60	82.35	0.59
E_2	0.0037	61.76	65.34	0.66
E_3	0.0173	73.90	82.34	0.57
E_4	0.1001	86.26	47.33	0.43
E_5	0.0188	58.55	76.44	0.76
E_6	0.1036	78.63	71.52	0.69
E_7	0.0104	84.56	98.24	0.56
E_8	0.0571	89.35	79.46	0.80

6 PALAVRAS FINAIS

O trabalho apresentado no presente texto descreve uma técnica para processar imagens de radar e de satélites, de resoluções diferentes, que leva em conta efeitos de distorção, e possibilita a comparação das medidas feitas por instrumentos a bordo de satélites, e imagens correspondentes feitas por radares meteorológicos no solo.

O foco de estudo do trabalho foi o aperfeiçoamento deste método, que envolve a aplicação de um filtro gaussiano assimétrico variável, descrito originalmente no trabalho de Calheiros e d'Oliveira (2007), para imagens de satélite e radar meteorológico.

A implementação incluiu a automatização de procedimentos que antes eram realizados de maneira artesanal, onde o estudo de cada evento poderia levar mais de uma semana e estar sujeito a erro humano, além de melhorias na velocidade do cálculo, e projeto de um software com melhor interface.

Métodos de busca foram implementados para melhorar o desempenho de fases do processo de filtragem e redução de resolução.

A eficácia do método desenvolvido foi testada em um conjunto de imagens selecionadas especialmente para tanto, e os resultados se mostraram superiores aos de outros métodos encontrados na literatura. O tempo de processamento médio é de pouco mais de um segundo para cada par de imagens, o que torna este método viável para o processamento de um grande número de eventos.

A interface, implementada em OpenGL, permite aos usuários observar os eventos e analisar visualmente o desempenho processo de filtragem.

Os resultados de oito eventos foram apresentados de forma visual juntamente com uma análise quantitativa, através de parâmetros estatísticos que permitem tornar quantitativa a discussão do resultado obtido.

6.1 Trabalhos futuros

Existem ainda tópicos relativos ao trabalho realizado que poderiam ser explorados em trabalhos futuros.

Seria bastante interessante a comparação das diversas relações $T_b - Z$, tanto as apresentadas anteriormente na Sessão 3.1.3.1 quanto outras que possam vir a ser

utilizadas. Um trabalho com esse foco poderia ajudar a entender em quais condições cada uma dessas relações é melhor indicada, além poder testar novas relações.

Seguindo uma linha semelhante de raciocínio, existiria também certo interesse em usar os dados processados, mas sem a aplicação de relações $T_b - Z$, para, através de técnicas como a mineração de dados, se obter as relações $T_b - Z$ propriamente ditas para cada evento ou para cada conjunto de eventos, de forma que essas relações fossem as mais acertadas possíveis. Talvez, provada a validade desse tipo de operação, seria possível inclusive gerar automaticamente as relações para cada caso como um módulo adicional do sistema apresentado.

O Método Calheiros e d'Oliveira (2007) se demonstrou eficiente para igualar as imagens meteorológicas, mas os resultados dos testes apresentados na Sessão 4.7 apontam que talvez fosse interessante investigar esse trabalho em outras aplicações. Seria bastante interessante estudar as condições e limites de aplicabilidade do método.

Por fim, alguns passos do método proposto, em especial o remapeamento ponderado descrito na Sessão 3.1.7, deveriam ser investigados mais a fundo. Um estudo comparativo dessa etapa com outros métodos, já adaptados a não linearidade do método Calheiros e d'Oliveira (2007) deveria ser realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R.; NEGRI, A. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. **Journal of Applied Meteorology**, v. 27, n. 1, p. 1387–1394, 1988. 1

ADLER, R. F.; MACK, R. A. Thunderstorm cloud height–rainfall rate relations for use with satellite rainfall estimation techniques. **Journal of Applied Meteorology**, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 23, n. 2, p. 280–296, 1984. 19

AHRENS, C. D. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. Minneapolis: West Publishing Company, 1988. ISBN 0314624775. 1, 16

ANGELIS, C. F.; MACHADO, L. A. T.; MORALES, C.; SILVA, S. A. A.; HENRIQUES, C. R.; NOGUEIRA, J. Rede de radares meteorológicos: ação conjunta de cea - inpe/cptec. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: CBMET, 2006. Disponível em:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.21.21.02>>. 4, 5

ANTÔNIO, M. A. **Técnica de ajuste em tempo real de medidas de chuva com radar**. Tese (Doutorado) — "Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas"UNESP, 1998. 19

ARKIN, P. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 107, n. 10, p. 1382–1387, 1979. 1

ARKIN, P.; MEISNER, B. The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the western hemisphere during 1982-84. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 115, n. 1, p. 51–74, 1987. 1

ATLAS, D. E. **Radar in meteorology**. Boston: American Meteorological Society, 1990. 3, 14

CALHEIROS, R. V.; D'OLIVEIRA, A. B. Retrieval of the gross structure of reflectivity: correcting for degraded peak values. In: **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society. 7, 8, 23

_____. Radar-satellite retrieval of cell structure: impact of Tb-Z relationships. In: RICHTER, A. (Ed.). **Geophysical Research Abstracts**. Göttingen: Copernicus Publications, 2007. v. 9, p. 10621. [xiv](#), [5](#), [8](#), [9](#), [15](#), [20](#), [23](#), [24](#), [25](#), [27](#), [30](#), [32](#), [33](#), [36](#), [43](#), [45](#), [46](#), [47](#), [48](#), [49](#), [57](#), [58](#), [69](#), [71](#), [72](#)

CALHEIROS, R. V.; MORALES, C. A.; ANAGNOSTOU, E. N. Precipitation structure from joint ground and space based radar observations. In: EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY, 1., 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: Finnish Meteorological Institute, 2000. [7](#), [23](#)

CALHEIROS, R. V.; TEPEDINO, P. R. P. Daily interval and range stratification in rainfall measurements with the Bauru Radar. In: EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY. **Proceedings...** [S.l.]: Finnish Meteorological Institute, 2006. p. 18–21. [20](#)

CHAUDHURY, K.; BARRUTIA, A.; UNSER, M. Fast adaptive elliptical filtering using box splines. **Imprint**, v. 1, p. 785–788, 2009. [9](#)

CHEN, F.; STAELIN, D. AIRS/AMSU/HSB precipitation estimates. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 445 Hoes Ln, Piscataway, NJ, 08854-1331, UK., v. 41, n. 2, p. 410–417, 2003. [3](#)

CHEN, F. W.; BICKMEIER, L. J.; BLACKWELL, W. J.; LESLIE, R. V.; STAELIN, D. H.; SURUSSAVADEE, C. Satellite-based estimation of precipitation using passive opaque microwave radiometry. In: WORKSHOP OF THE INTERNATIONAL PRECIPITATION WORKING GROUP, 3., 2006, Melbourne. **Proceedings...** Hamburg: International Precipitation Working Group, 2006. [2](#), [3](#)

CHEN, F. W.; STAELIN, D. H. AIRS/AMSU/HSB precipitation estimates. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 410–417, 2003. [7](#)

CHUVIECO, E. **Earth observation and global change**. [S.l.]: Springer, 2008. [6](#)

DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. **C++ how to program**. [S.l.]: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1998. [18](#), [38](#)

DONEAUD, A.; IONESCU-NISCOV, S.; PRIEGNITZ, D.; SMITH, P. The area-time integral as an indicator for convective rain volumes. **Journal of**

Applied Meteorology, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 23, n. 4, p. 555–561, 1984. 1

ECKEL, B. **Thinking in C++**. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc Upper Saddle River, NJ, USA, 1995. 38

FOURNIER, A.; FIUME, E. Constant-time filtering with space-variant kernels. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 15., 1988, Atlanta. **Proceedings...** [S.l.]: ACM, 1988. p. 229–238. 9

GARCIA, J. V. C.; D'OLIVEIRA, A. B.; CALHEIROS, R. V. A free software available for radar data display. In: EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HIDROLOGY, 5., 2008, Helsinki. Helsinki: Finish Meteorological Institute, 2008. 13

GEUSEBROEK, J.; SMEULDERS, A.; WEIJER, J. V. D. Fast anisotropic gauss filtering. **IEEE Transactions on Image Processing**, Springer, v. 12, n. 8, p. 938–943, 2003. 9

GLASSNER, A. **Graphics gems**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1993. 9

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. [S.l.]: Prentice Hall, 2007. 9, 33

GRIFFITH, C.; WOODLEY, W.; BROWNER, S.; TEIJEIRO, J.; MAIER, M.; MARTIN, D.; STOUT, J.; SIKDAR, D. Rainfall estimation from geosynchronous satellite imagery during daylight hours. 1976. 1

GRIFFITH, C.; WOODLEY, W.; GRUBE, P.; MARTIN, D.; STOUT, J.; SIKDAR, D. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery-visible and infrared studies. **Mon. Wea. Rev.**, v. 106, n. 8, p. 1, 1978. 1

GRIFFITH, C. G.; AUGUSTINE, J.; WOODLEY, W. Satellite rain estimation in the US High Plains. **Journal of Applied Meteorology**, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 20, n. 1, p. 53–66, 1981. 1

HARRIS, F. et al. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. **Proc. IEEE**, v. 66, n. 1, p. 51–83, 1978. 9

- HEARN, D.; BAKER, M. P. **Computer graphics: C version**. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc Upper Saddle River, NJ, USA, 1996. 30
- HOLL, G. Collocating satellite-based radar and radiometer measurements to develop an ice water path retrieval. Luleå tekniska universitet, 2009. 10
- HONG, Y.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S.; GAO, X. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. **UC Irvine: Retrieved from:** <http://www.escholarship.org/uc/item/2x4152rx>, 2004. 1
- HORNE, M. V.; VIVONI, E.; ENTEKHABI, D.; HOFFMAN, R.; GRASSOTTI, C. Evaluating the effects of image filtering in short-term radar rainfall forecasting for hydrological applications. **Meteorological Applications**, Cambridge Univ Press, v. 13, n. 03, p. 289–303, 2006. 9
- HSU, K.; GAO, X.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. **Journal of Applied Meteorology**, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 36, n. 9, p. 1176–1190, 1997. 1
- JOHNSON, R. C. Airline flights get less turbulent. **eetimes com**, 9 2007. 3
- KAMARIANAKIS, Y.; CHRYSOULAKIS, N.; FEIDAS, H.; KOKOLATOS, G. Comparing rainfall estimates derived from rain gages and satellite images at the eastern Mediterranean region. **N. Chrysoulakis**, bepress, p. 43, 2006. 2
- KELKAR, R. R. **Satellite meteorology**. [S.l.]: BSP, 2007. 6, 19
- KILGARD, M. J. The OpenGL utility toolkit (GLUT) programming interface API version 3. **Web Site:** <http://www.opengl.org/developers/documentation/glut>, 1996. 38
- LEHMANN, T.; GONNER, C.; SPITZER, K. et al. Survey: interpolation methods in medical image processing. **IEEE Transactions on medical imaging**, Citeseer, v. 18, n. 11, p. 1049–1075, 1999. 9
- LOPEZ, R.; BLANCHARD, D.; HOLLE, R.; THOMAS, J.; ATLAS, D.; ROSENFELD, D. Estimation of areal rainfall using the radar echo area time integral. **Journal of Applied Meteorology**, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 28, n. 11, p. 1162–1175, 1989. 1

- MECKLENBURG, S.; JOSS, J.; SCHMID, W. Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 239, n. 1-4, p. 46–68, 2000. 10, 34, 46
- MEIJERING, E. A chronology of interpolation. **Proc. IEEE**, Citeseer, v. 90, n. 3, p. 319–342, 2002. 9
- MENDELSON, R.; KURUKULASURIYA, P.; BASIST, A.; KOGAN, F.; WILLIAMS, C. Climate analysis with satellite versus weather station data. **Climatic Change**, Springer, v. 81, n. 1, p. 71–83, 2007. 19
- MEYER, P. L. **Probabilidade aplicada à estatística**. [S.l.]: Editora LTC SA, 2000. 41
- MITCHELL, D.; NETRAVALI, A. Reconstruction filters in computer-graphics. **ACM Siggraph Computer Graphics**, ACM New York, NY, USA, v. 22, n. 4, p. 221–228, 1988. 9
- NATIONAL WEATHER SERVICE. NEXRAD radar operations center, WSR-88D. **Web Site: <http://www.roc.noaa.gov/>**, 03 2007. 3, 13
- NCSA, H. **User's guide HDF4 2r 0**. 1998. 22
- NEGRI, A.; ADLER, R.; WETZEL, P. Satellite rain estimation: An analysis of the Griffith-Woodley technique. **J. Climate Appl. Meteor**, v. 23, p. 102–116, 1984. 1
- NEIDER, J.; DAVIS, T.; WOO, M.; SHREINER, D. **OpenGL programming guide: The official guide to learning opengl**. [S.l.]: Pearson Education, 2005. 37
- OPENGL, A. **OpenGL reference manual: The official reference document to OpenGL Version 1.1**. [S.l.]: Addison-Wesley, Reading, MA, 1997. 37
- OPPENHEIM, A.; SCHAFFER, R.; BUCK, J. **Discrete-time signal processing**. [S.l.]: Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1989. 9
- Pereira Filho, A. J. Integrating gauge, radar and satellite rainfall. In: **WWRP International Precipitation Working Group Workshop, CGMS-WMO, Monterey, CA, USA**. [S.l.: s.n.], 2004. 4
- Pereira Filho, A. J.; NEGRI, A.; NAKAYAMA, P. T. Gauge, radar and satellite areal rainfall estimates. In: **Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar**. [S.l.: s.n.], 2004. 6, 23

- RINEHART, R. E. **Radar for meteorologists**. [S.l.]: Rinehart Publications Grand Forks, ND, 1997. 14
- SAID, A. **New filters for image interpolation and resizing**. [S.l.], 2007. 9
- SOMMERVILLE, I.; MELNIKOFF, S. S. S.; ARAKAKI, R.; BARBOSA, E. de A.; HIRAMA, K. **Engenharia de software**. [S.l.]: Addison Wesley, 2003. 39
- STAEELIN, D.; CHEN, F. Precipitation observations near 54 and 183 GHz using the NOAA-15 satellite. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2322–2332, 2000. 3
- STROUSTRUP, B. A history of C++: 1979–1991. In: CONFERENCE ON HISTORY OF PROGRAMMING LANGUAGES, 15., 1993, Cambridge. **Proceedings...** New York: ACM, 1996. 38
- THÉVENAZ, P.; BLU, T.; UNSER, M. Interpolation revisited. **IEEE Trans. Med. Imaging**, Citeseer, v. 19, n. 7, p. 739–758, 2000. 9
- WRIGHT, R. S.; LIPCHAK, B. **OpenGL superBible**. [S.l.]: Sams Indianapolis, IN, USA, 2004. 37
- ZHU, Y.; TOTH, Z.; WOBUS, R.; RICHARDSON, D.; MYLNE, K. The economic value of ensemble-based weather forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 1, p. 73–83, 2002. 1

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 programas 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. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

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