

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RENAN HENRIQUE LUZ SELUZNIAK

CONTROLE DE QUALIDADE EM DADOS DE RADAR POLARIMÉTRICO COM
APOIO DE VISUALIZADOR INTERATIVO DE DADOS

CURITIBA
2016

RENAN HENRIQUE LUZ SELUZNIAK

CONTROLE DE QUALIDADE EM DADOS DE RADAR POLARIMÉTRICO COM
APOIO DE VISUALIZADOR INTERATIVO DE DADOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática, do Departamento de Matemática, Setor de Ciências Exatas e do Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof^o. Dr. Sergio Scheer

Coorientador: Dr. Cesar Augustus Assis Beneti

CURITIBA

2016

Seluzniak, Renan Henrique Luz

Controle de qualidade em dados de radar polarimétrico com apoio de visualizador interativo de dados / Renan Henrique Luz Seluzniak.- Curitiba, 2016.

105 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Sérgio Scheer

Coorientador: Cesar Augustus Assis Beneti

Bibliografia: p.99-104

1. Radar. 2. Controle de qualidade. I. Scheer, Sérgio. II. Beneti, Cesar Augusto Assis. III. Título.

CDD 621.3841

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de RENAN HENRIQUE LUZ SELUZNIAK, intitulada: "CONTROLE DE QUALIDADE EM DADOS DE RADAR POLARIMÉTRICO COM APOIO DE VISUALIZADOR INTERATIVO DE DADOS ", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua

APROVAÇÃO

Curitiba, 05 de Julho de 2016.



Prof SÉRGIO SCHEER

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



Prof KLAUS DE GEUS

Avaliador Interno (UFPR)



Prof LEONARDO CALVETTI

Avaliador Interno (UFPEL)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e saúde.

A minha família, em especial meus pais, que me ajudaram a manter o foco nos estudos para chegar aqui, sem eles, nada disso seria possível.

Agradeço ao professor Sergio Scheer, meu orientador, e ao Cesar Beneti, meu coorientador, por me orientarem neste trabalho, sempre tirando minhas dúvidas e buscando o meu melhor.

Gostaria de agradecer meu colega de pesquisa e amigo Tiago Buriol, sempre ajudando sobre problemas com visualização de dados, sem ele, grande parte do trabalho não seria possível.

Aos meus amigos de mestrado Alana, Camila, Diandra, Jorge, Mariana, Tiago e Tulipa, pela paciência que tiveram comigo tanto para aguentar a minha pessoa quanto para compartilhar conhecimentos.

Aos meus amigos de infância Felipe e Roger, que sempre posso contar com eles para o que der e vier, sendo companheiros nas horas mais difíceis.

Aos professores do PPGMNE, que contribuíram para minha formação.

Ao SIMEPAR pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e pelos dados disponibilizados.

À CAPES, pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste mestrado.

RESUMO

Radars meteorológicos têm a característica de possibilitar a previsão de eventos severos à curto prazo. Porém, a qualidade dos dados provenientes de radares é comumente afetada por sinais indesejados, que não correspondem à precipitação, ocasionados pela presença de insetos e pássaros, topografia e outras interferências. Nesse contexto, sistemas de processamento e visualização interativa possuem grande importância, pois auxiliam a análise e consequente tomada de decisão com base na observação desses dados. Considerando o desenvolvimento da tecnologia de radares ocorrida nos últimos anos, processar e visualizar grandes quantidades de dados tem se tornado um desafio. Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema interativo para processamento e visualização de dados de radares meteorológicos, bem como a implementação de dois algoritmos para o controle da qualidade dos dados (filtros). A visualização interativa e o controle de qualidade desses dados têm particular importância para que analistas possam, de forma rápida e eficaz, extrair informações úteis e tomar decisões. Os dois filtros elaborados se baseiam em trabalhos existentes na literatura. O primeiro utiliza apenas a refletividade para correção dos dados e o segundo utiliza as novas informações disponibilizadas pelo radar polarimétrico dual. As comparações foram realizadas com a comparação com o algoritmo de classificação de hidrometeoros, disponível no software de operação do radar de dupla polarização. Dentre os dois filtros apresentados, a técnica que utiliza as variáveis polarimétricas apresentou melhores resultados em quase todos os requisitos, sendo inferior somente em tempo de processamento.

Palavras-chave: Visualização Científica Interativa, Radar Polarimétrico Dual, Controle de Qualidade.

ABSTRACT

Weather radars have the characteristic of enabling the prediction of short term severe events. However, the quality of data from radars is commonly affected by unwanted signals, which do not correspond to the precipitation, caused by the presence of insects and birds, topography and other interferences. In this context, processing systems and interactive visualization are very important because they help the analysis and subsequent decision making based on the observation of such data. Considering the development of radar technology in recent years, processing and viewing large amounts of data became a challenge. This paper reports the development of an interactive system for processing and weather radar data visualization, and the implementation of two algorithms for quality control of data (filters). The interactive visualization and quality control of such data are particularly important for analysts to quickly and effectively extract useful information and make decisions. The implemented filters are based on existing studies in the literature. The first uses only the reflectivity for data correction and the second uses the new information provided by the dual polarimetric radar. The comparisons were performed with the comparison with the hydrometeor classification algorithm, available in the dual polarization radar operational software. Of the two filters shown, the technique that uses the polarimetric variables showed better results in almost all of the requirements and lower results in processing time.

Key-words: Interactive Scientific Visualization, Dual Polarimetry Radar, Quality Control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– FUNCIONAMENTO DO RADAR METEOROLÓGICO.	20
FIGURA 2	– EXEMPLO DE PPI PARA O MOMENTO REFLETIVIDADE DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/07/2014 ÀS 12H08MIN.	21
FIGURA 3	– ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DE UMA VARREDURA VOLUMÉTRICA DE RADAR.	22
FIGURA 4	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: REFLETIVIDADE. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.	23
FIGURA 5	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: VELOCIDADE RADIAL. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN. ...	24
FIGURA 6	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: LARGURA ESPECTRAL. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN. ...	25
FIGURA 7	– DIFERENÇA NA EMISSÃO E DETECÇÃO DE PARTÍCULAS ENTRE UM RADAR DE POLARIZAÇÃO SIMPLES E UM RADAR DE POLARIZAÇÃO DUPLA.	26
FIGURA 8	– ESQUEMA DA COPOLARIZAÇÃO.	27
FIGURA 9	– ESQUEMA DA POLARIZAÇÃO CRUZADA.	27
FIGURA 10	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: REFLETIVIDADE DIFERENCIAL. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.	29
FIGURA 11	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COPOLAR. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.	30
FIGURA 12	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: DIFERENCIAL DE FASE DE PROPAGAÇÃO. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.	31
FIGURA 13	– REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: DIFERENCIAL DE FASE ES-	

PECÍFICA. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.	32
FIGURA 14 – RADAR POLARIMÉTRICO DUAL DE CASCAVEL.	33
FIGURA 15 – INTERFACE DO RADEX.	41
FIGURA 16 – PPI PARA REFLETIVIDADE GERADA NO RADEX.	43
FIGURA 17 – CONVERSÃO DE COORDENADAS NECESSÁRIA NA CORRE- ÇÃO DO CÁLCULO DA ALTURA PARA O CORTE VERTICAL.	44
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DO CORTE VERTICAL E DO ASCOPE.	44
FIGURA 19 – GRÁFICO DE DISPERSÃO (PARA REFLETIVIDADE E REFLETI- VIDADE DIFERENCIAL) E PERFIL VERTICAL (PARA REFLETIVI- DADE).	46
FIGURA 20 – CORTINA UTILIZADA PARA LOCALIZAÇÃO EXATA DA CÉLULA QUE ESTÁ SENDO ESTUDADA.	47
FIGURA 21 – CORTINA UTILIZADA PARA COMPARAÇÃO DE DOIS MOMEN- TOS DISTINTOS, NO CASO A REFLETIVIDADE E A CORRELAÇÃO CO-POLAR.	47
FIGURA 22 – SELEÇÃO DOS ÂNGULOS PARA A REALIZAÇÃO DO CORTE RADIAL.	48
FIGURA 23 – THRESHOLD PARA VALORES DE REFLETIVIDADE 12 DBZ. ...	49
FIGURA 24 – APLICAÇÃO DO ZOOM E PAN PARA SELEÇÃO DE REGIÃO ES- PECÍFICA.	50
FIGURA 25 – VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA REGIÃO DELIMITADA PELO USUÁ- RIO.	53
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO DO HISTOGRAMA NO RADEX.	54
FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO DO HISTOGRAMA APÓS A APLICAÇÃO DO ZOOM E PAN.	54
FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO DO HISTOGRAMA APÓS A APLICAÇÃO DO THRESHOLD.	55
FIGURA 29 – GERAÇÃO DE FIGURAS POR MEIO DAS SUPERFÍCIES DO RA- DEX.	56

FIGURA 30 – PROPAGAÇÕES ANÔMALAS.	60
FIGURA 31 – ECO DE TERRENO.	60
FIGURA 32 – ÁRVORE DE DECISÃO PARA O FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO.	64
FIGURA 33 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL E AS IMAGENS GERADAS PARA CADA ETAPA DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO.	67
FIGURA 34 – FLUXOGRAMA PARA O FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL.	69
FIGURA 35 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL E AS IMAGENS GERADAS PARA CADA ETAPA DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL.	74
FIGURA 36 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A) E IMAGEM COM TEXTURA (B) PARA DIA 15/07/2015 ÀS 15H30MIN DO RADAR DE CASCAVEL.	75
FIGURA 37 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A) E IMAGEM GERADA PELO FILTRO MANUAL (B) PARA DIA 15/07/2015 ÀS 15H30MIN DO RADAR DE CASCAVEL.	76
FIGURA 38 – REPRESENTAÇÃO DO PRODUTO CHM NO RADEX PARA DIA 15/07/2015 ÀS 15H30MIN DO RADAR DE CASCAVEL.	78
FIGURA 39 – DIFERENÇAS ENTRE A REFLETIVIDADE CORRIGIDA (A) E A REFLETIVIDADE (B).	79
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A), IMAGEM GERADA PELO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO (B) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (C), DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC.	83
FIGURA 41 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A), IMAGEM GERADA PELO FILTRO STEINER (B) & SMITH MODIFICADO E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (C), DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC.	84
FIGURA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A), IMAGEM GERADA PELO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO (B) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (C), DO DIA 09/03/2016	

ÀS 20H00MIN UTC.	85
FIGURA 43– COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A), IMAGEM GERADA PELO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL (B) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (C), DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC.	86
FIGURA 44– COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A), IMAGEM GERADA PELO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL (B) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (C), DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC.	87
FIGURA 45– COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (A), IMAGEM GERADA PELO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL (B) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (C), DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC.	88
FIGURA 46 – REPRESENTAÇÃO DO GRÁFICO BOXPLOT.	90
FIGURA 47 – VALORES DA %REMOVIDA PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.	91
FIGURA 48 – VALORES DA %ADICIONADA PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.	92
FIGURA 49 – VALORES DA %PRECIPITAÇÃO PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.	93
FIGURA 50– VALORES DA %NÃO-PRECIPITAÇÃO PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.	94
FIGURA 51 – VALORES DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.	95
FIGURA 52 – VALORES DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS COM RELAÇÃO AO HIDROMETEOROS.	32
TABELA 2	– MÉTODO DA SENSIBILIDADE E ESPECIFICIDADE.	80
TABELA 3	– FORMATO PADRÃO DAS TABELAS USADAS PARA ANÁLISE DE RESULTADOS.	82
TABELA 4	– REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO, DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 819 MS.	83
TABELA 5	– REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO, DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 664 MS.	84
TABELA 6	– REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO, DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 791 MS.	85
TABELA 7	– REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL, DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 4475 MS.	87
TABELA 8	– REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL, DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 3915 MS.	88
TABELA 9	– REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL, DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 4956 MS.	89

LISTA DE SIGLAS

BD	<i>Big drops</i>
BI	<i>Biological</i>
CHM	Classificação de Hidrometeoros
CQ	Controle de Qualidade
DS	<i>Dry snow</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
GR	<i>Graupel</i>
GC	<i>Ground Clutter</i>
HA	<i>Hail</i>
HUD	<i>Heads-Up Display</i>
HR	<i>Heavy rain</i>
IC	<i>Ice crystals</i>
PPI	<i>Plan Position Indicator</i>
PA	Propagações Anômalas
RADEX	<i>Radar Data Explorer</i>
RA	<i>Rain</i>
SC	<i>Sea clutter</i>
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
WS	<i>Wet snow</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Altitude do <i>bin</i>
θ	Ângulo de azimute
ϕ	Ângulo de elevação da antena
r	Distância da partícula ao radar
Z	Refletividade representada pela escala logarítmica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 MOTIVAÇÃO	17
1.3 OBJETIVOS	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 CONCEITOS METEOROLÓGICOS	19
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
2.2 RADAR METEOROLÓGICO	19
2.2.1 Funcionamento do Radar	20
2.2.2 Visualização dos Dados	20
2.2.3 Radar Doppler	22
2.3 RADAR POLARIMÉTRICO DUAL	25
2.4 VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS	28
2.4.1 Refletividade diferencial	28
2.4.2 Coeficiente de correlação copolar	29
2.4.3 Diferencial de fase de propagação	30
2.4.4 Diferencial de fase específica	31
2.5 RADAR UTILIZADO	32
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
3 O VISUALIZADOR INTERATIVO RADEX	35
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	35
3.2 RADEX	35
3.3 PYTHON	36

3.3.1	Pygame	37
3.3.2	Numpy	38
3.3.3	Py-ART	39
3.4	FUNCIONALIDADES DO RADEX	39
3.4.1	PPI	41
3.4.2	Corte vertical e Ascope	43
3.4.3	Gráfico de dispersão e perfil vertical	45
3.4.4	A função cortina	46
3.4.5	Corte radial	47
3.4.6	Threshold	48
3.4.7	Zoom e Pan	49
3.4.8	Mouse	51
3.4.9	Visualização 3D	52
3.4.10	Histograma	53
3.4.11	Geração de Figuras	55
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
4	CONTROLE DE QUALIDADE NA VISUALIZAÇÃO DE DADOS DE RADAR METEOROLÓGICO	58
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	58
4.2	COLETA DE DADOS	58
4.2.1	Dados meteorológicos que não representam precipitação	59
4.2.2	Dados não meteorológicos	59
4.2.3	Controle de qualidade	60
4.3	FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO	62
4.4	FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL	67
4.4.1	Textura	73
4.5	FILTRO MANUAL	75

4.6 CLASSIFICAÇÃO DE HIDROMETEOROS	76
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5 RESULTADOS	79
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	79
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
5.2.1 Análises do Filtro Steiner & Smith Modificado	82
5.2.2 Análises do Filtro Polarimétrico Dual	86
5.2.3 Comparação dos Resultados	89
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
6 CONCLUSÕES	97
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A meteorologia é definida como a ciência que estuda os fenômenos que ocorrem na atmosfera. Esses fenômenos estão relacionados com o estado físico, dinâmico e químico da atmosfera, e a superfície terrestre subjacente. Desta forma, a meteorologia busca compreender de forma abrangente os fenômenos atmosféricos que são presenciados no cotidiano.

Por meio de observações de dados obtidos por sensores ou gerados por modelos numéricos, a identificação da precipitação auxilia diversas áreas que vão desde a defesa civil até o agronegócio (LOPES DA ROCHA FILHO; CONDE; ANDRIOLI, 2013). Com isso, é possível prever fenômenos naturais, tais como enchentes, tempestades, tornados, possibilitando reduzir os prejuízos causados a vários setores da sociedade.

Para realizar estas previsões e possibilitar tomadas de decisão, são utilizadas informações obtidas a partir de pluviômetros, disdrômetro, satélites (estações meteorológicas), radares meteorológicos e outros equipamentos. Dentre os vários equipamentos utilizados, o radar meteorológico tem especial importância por possibilitar a previsão de eventos severos a curto prazo, identificando e monitorando ocorrências de tempestades convectivas, precipitações intensas e outros eventos meteorológicos (CALVETTI; BENETI; PEREIRA FILHO, 2003; OLIVEIRA, 2014).

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema interativo para processamento e visualização de dados de radares meteorológicos, bem como a implementação de algoritmos para o controle da qualidade dos dados. O controle de qualidade e a visualização interativa desses dados têm particular importância para que analistas possam, de forma rápida e eficaz, extrair informações úteis e tomar decisões.

1.2 MOTIVAÇÃO

A tecnologia de radares meteorológicos tem evoluído consideravelmente nos últimos anos, e, com essa evolução, novas informações surgem sem haver ainda um conhecimento completo sobre o que elas podem representar para a análise do meteorologista. Por outro lado, em geral, os sistemas de visualização de dados de radar não possuem a capacidade de analisar todas estas novas informações (BENETI et al., 2015, 2014). Por essa razão, a comunidade internacional tem dado grande importância para o desenvolvimento de *softwares open source* que possibilitem visualizar as novas informações e as coletadas da maneira tradicional (HEISTERMANN et al., 2015).

Os dados de radares meteorológicos são comumente afetados por fatores que limitam o trabalho do meteorologista em estimar a precipitação, ligada na identificação de eventos severos, podendo interferir na tomada de decisão ou impedir a detecção de um evento. Por essa razão, o tratamento destes dados passa a ser prioridade para melhorar a interpretação e minimizar erros.

Segundo Lakshmanan et al. (2015), uma das possibilidades das novas informações obtidas pelos modernos radares de dupla polarização é a realização de controle de qualidade, mostrando a importância de se possuir ferramentas que permitam analisar estas novas informações e entender como elas podem ser úteis para identificar dados que não representam precipitação, para a realização de controles de qualidade dos dados.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho incluem contribuir no desenvolvimento do software de visualização interativa para dados de radar, possibilitando uma maneira diferente de analisar os dados, com novas funcionalidades e algoritmos de controle de qualidade. Além disso, aplicar métodos que realizem o controle de qualidade, buscando eficiência

nos métodos e analisando o equilíbrio entre tempo de processamento e taxa de correção dos dados. Por fim, implantar o software no ambiente operacional a fim de testar suas funcionalidades. Com isso pretende-se contribuir na direção de se descobrir como usufruir melhor das novas informações coletadas para realização de previsões e melhor identificação de fenômenos detectáveis pelo radar.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta conceitos básicos da meteorologia. No Capítulo 3 é descrito o visualizador interativo RADEX, seu desenvolvimento, suas funcionalidades e suas aplicações na meteorologia, dentre elas o controle de qualidade. Como remover ou corrigir esses dados contaminados é descrito no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos, incluindo comparação entre as técnicas desenvolvidas com técnicas que o próprio radar possui para o controle de qualidade dos dados. Por fim, no Capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS METEOROLÓGICOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste Capítulo serão vistos os conceitos meteorológicos, retratando desde o surgimento do radar meteorológico, seu funcionamento, e produtos gerados por ele. Ainda, será apresentado o radar de polarização dupla (polarimétrico), seu funcionamento, novas informações disponíveis devido à sua forma de coleta de dados, e no que essas novas informações podem contribuir para a detecção das partículas da atmosfera.

2.2 RADAR METEOROLÓGICO

Após o sucesso do rádio, surgiram várias experiências no intuito de aproveitar esse recurso para outros fins. Entre uma dessas experiências, surgiu o radar, acrônimo para “*R*Adio *D*etection *A*nd *R*anging”. O radar teve seu desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial, voltado somente para fins militares na detecção de aeronaves inimigas. Uma das invenções chave que fizeram o radar ser bem sucedido foi a do tubo transmissor *Magnetron* por John Randall e Henry Bota na Universidade de Birmingham. O *Magnetron* tornou possível radares leves que operam nas frequências mais altas. Com o uso de sinais de alta frequência, foi possível reduzir o tamanho da antena consideravelmente. Isso permitiu o radar determinar a direção de um alvo com muito mais precisão.

Tendo em vista que os alvos de interesse durante a Segunda Guerra Mundial foram principalmente aviões, a necessidade de encontrá-los com precisão se tornou uma motivação para melhorar essa capacidade. Ao término da guerra, muitos equipamentos militares acabaram sendo disponibilizados para civis, e com isto surgiu o interesse no estudo da meteorologia (RINEHART, 2004).

2.2.1 FUNCIONAMENTO DO RADAR

O funcionamento do radar é baseado no rádio, por meio das ondas eletromagnéticas. O radar meteorológico é constituído de uma antena que transmite e recebe sinais de alta frequência.

Na Figura 1, é descrito o esquema do processo da coleta de dados. A medição, é realizada por meio de emissão de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas transmitidas viajam à velocidade da luz (aproximadamente 300 mil km/s). Ao entrarem em contato com a partícula na atmosfera, parte da energia é refletida em várias direções e parte retorna até a antena (OLIVEIRA, 2014; SANTOS, 2014). Após o retorno, o software do radar se encarrega de separá-lo em intervalos com comprimento constante (denominado *bin*) na direção radial de acordo com as configurações do radar. A coleta de dados pode ser realizada tanto para outros azimutes (raios) como para outras angulações da antena (elevação), conforme a necessidade.

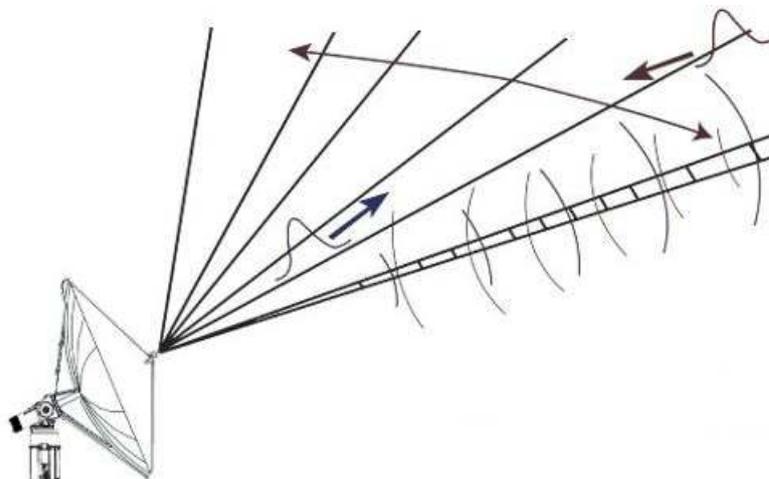


FIGURA 1: FUNCIONAMENTO DO RADAR METEOROLÓGICO.

FONTE: O autor (2014)

2.2.2 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

A visualização dos dados (produtos) coletados pelo radar meteorológico é descrita em várias formas, dentre elas, o PPI (*Plan Position Indicator*). O PPI é a projeção de uma única elevação (varredura de um giro completo sob um ângulo vertical fixo,

podendo ser qualquer elevação) (SAUVAGEOT, 1992; FABRY, 2015) sobre um mapa ou segundo uma projeção cartográfica (Figura 2). A geração da imagem de um PPI será melhor discutida no Capítulo 3.

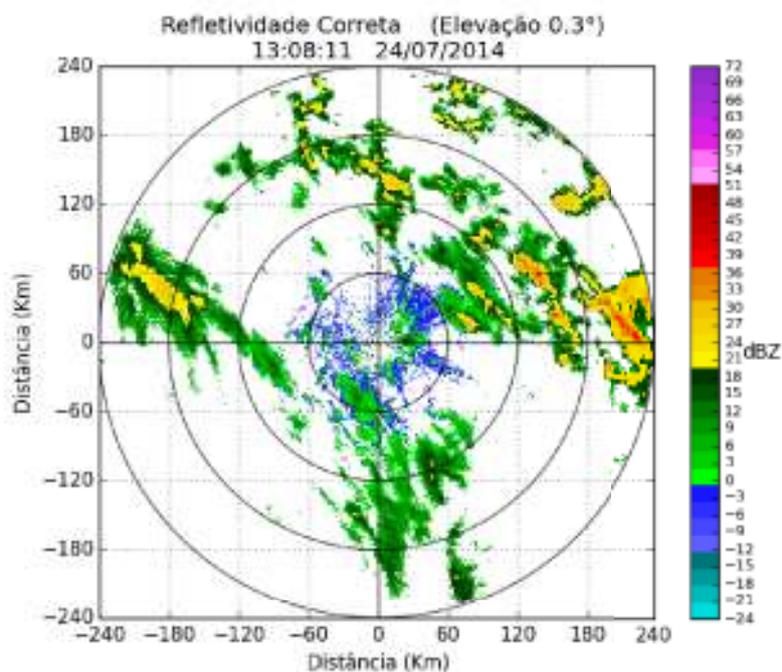


FIGURA 2: EXEMPLO DE PPI PARA O MOMENTO REFLETIVIDADE DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/07/2014 ÀS 12H08MIN.

FONTE: O autor (2014)

Os radares costumam realizar a coleta dos dados de várias maneiras, porém é comumente utilizada a varredura volumétrica, representada na Figura 3. Ela coleta sucessivos PPIs e para essa coleta são utilizados mais de uma angulação do radar, conforme descrito por Bonato (2014).

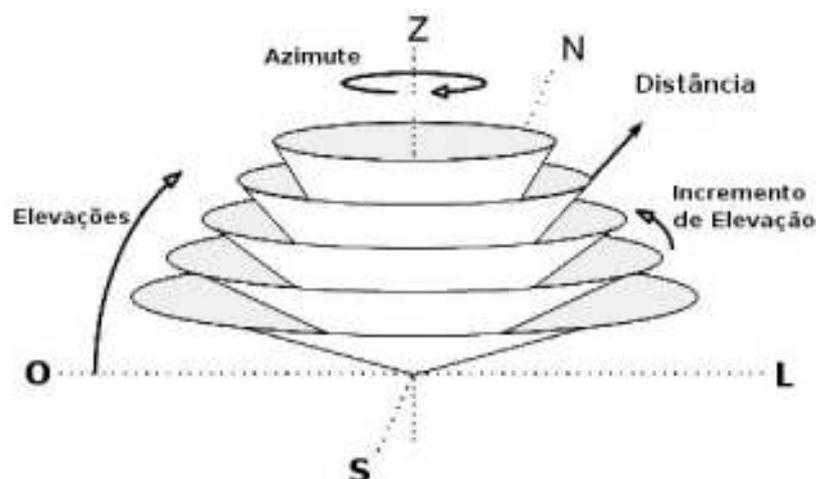


FIGURA 3: ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DE UMA VARREDURA VOLUMÉTRICA DE RADAR.

FONTE: O autor (2014)

2.2.3 RADAR DOPPLER

Uma das coisas mais importantes que o radar pode medir, está relacionado com a seguinte frase: a velocidade do alvo. O princípio pelo qual o radar Doppler opera, foi explicado pela primeira vez em 1842 pela pessoa após o qual este radar foi nomeado, Christian J. Doppler (RINEHART, 2004). O radar Doppler faz a comparação entre a frequência do sinal transmitido com o sinal recebido e mede o desvio de frequência, resultando na velocidade da partícula captada pelo sinal (SILVEIRA, 1998). Esse princípio é usado para vários tipos de radares, dentre eles estão o radar meteorológico, radares de trânsito, e outros.

Para o radar meteorológico de tipo Doppler são medidos três tipos de momentos: refletividade (Z), velocidade radial (V) e largura espectral (σ).

A refletividade é determinada pelo número e tamanho das partículas presentes no volume do dado coletado (D) sendo definida pela equação 1:

$$z = \sum_{vol} D^6. \quad (1)$$

A refletividade é expressa pela unidade mm^6/m^3 . Porém, os valores que a refleti-

vidade pode assumir com essa unidade variam entre 0 e 36.000.000, sendo convencional fazer uma compressão desses valores adotando a escala logarítmica. Nesse caso, a refletividade pode ser escrita pelo equação 2:

$$Z = 10\log_{10}\left(\frac{z}{1\text{mm}^6/\text{m}^3}\right). \quad (2)$$

A refletividade é denotada pela unidade dBZ e possui valores típicos entre -24 dBZ e 72 dBZ (FABRY, 2015). Uma representação deste momento pode ser vista na Figura 4.

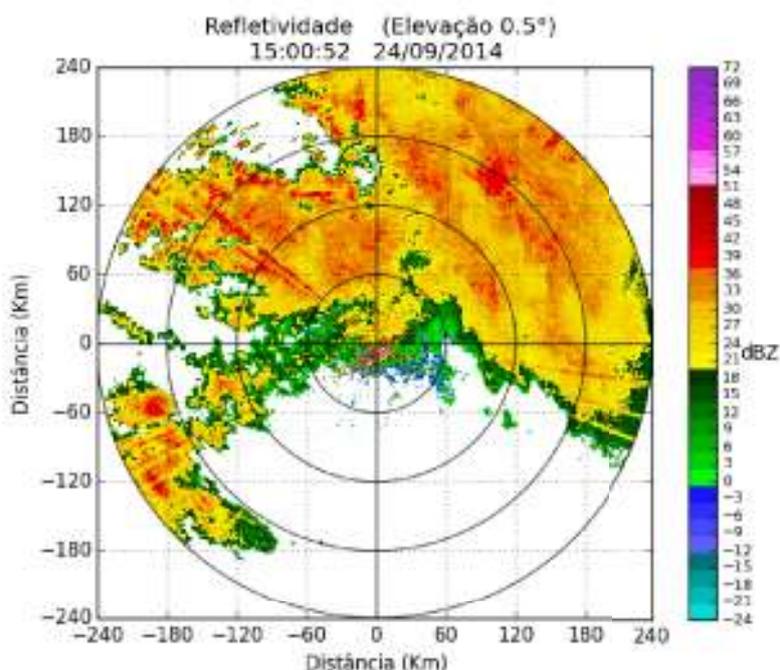


FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: REFLETIVIDADE. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

A velocidade radial representa a qual velocidade a partícula detectada está se distanciando ou se aproximando do radar. O cálculo da velocidade é feito por meio da derivada da distância (r) da partícula com relação ao tempo (t), sendo descrito pela equação 3:

$$V = \frac{dr}{dt}. \quad (3)$$

A velocidade possui a unidade de medida m/s, usam-se como convenção valores negativos para partículas se aproximando do radar e valores positivos para partículas se afastando do radar (Figura 5).

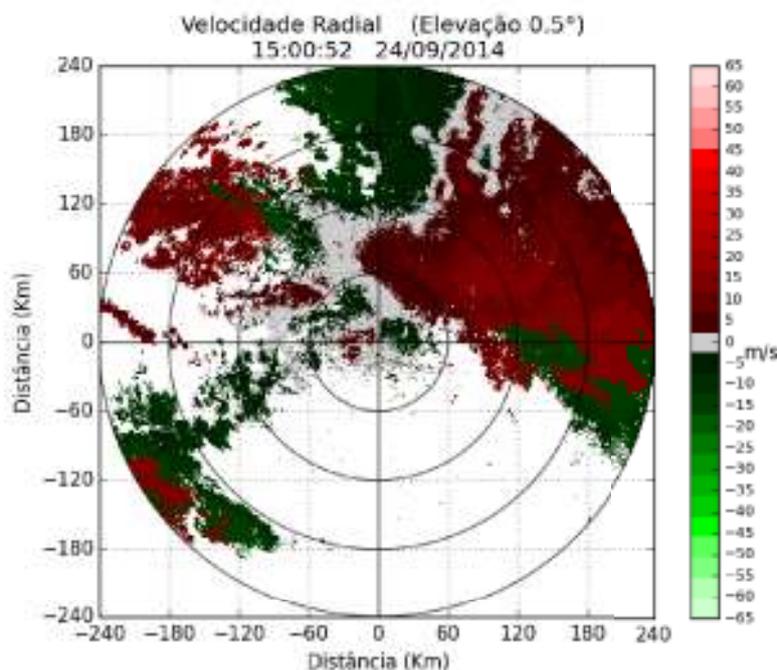


FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: VELOCIDADE RADIAL. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

A largura espectral é a variância da velocidade. Esta variação é, essencialmente, a velocidade individual de cada elemento na amostra (V_i) a partir da velocidade média (V_{ave}) delas, sendo expressada pela unidade m/s. A largura espectral, representada pela Figura 6, é definida pela equação 4:

$$\sigma = \frac{\sum(V_i - V_{ave})^2}{N - 1}. \quad (4)$$

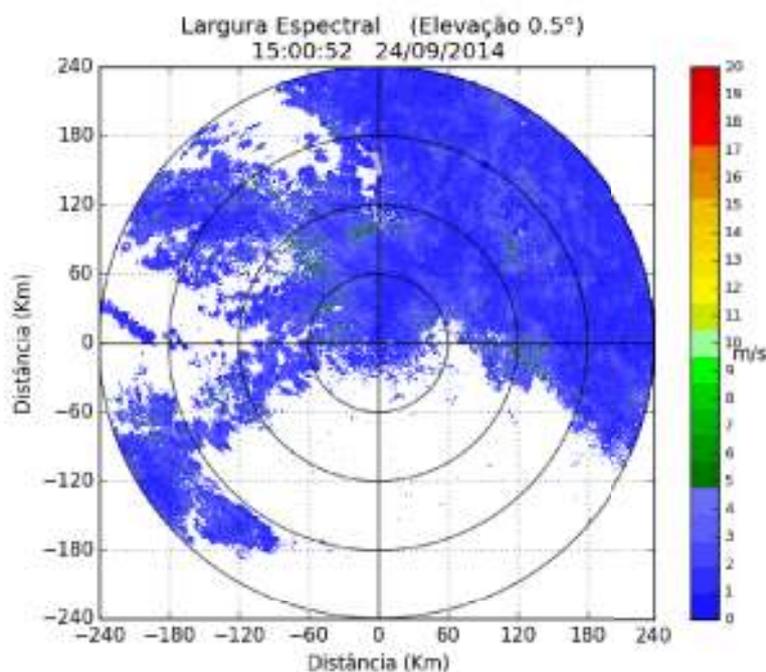


FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: LARGURA ESPECTRAL. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

2.3 RADAR POLARIMÉTRICO DUAL

O radar polarimétrico dual (radar de dupla polarização) tem a sua propagação de sinal eletromagnético com orientações tanto horizontal como vertical.

A emissão de ondas na horizontal é relacionada com as dimensões horizontais de alvos, enquanto a emissão de ondas na vertical pode ser relacionada às dimensões verticais. Observa-se, como apresentado por Fabry (2015), que quando comparadas as emissões na vertical e horizontal, é possível obter informações sobre a forma e, em certa medida, o tamanho do hidrometeoro (partícula detectada pelo radar).

Contudo, isso seria irrelevante se as partículas na atmosfera fossem todas esféricas, ou pelo menos, pouco simétricas em relação ao eixo de propagação da onda. Porém, as partículas individuais não são simétricas, como flocos de neve que têm formas complexas e com várias orientações, dificultando sua identificação. Assim, a polarização dupla, possibilita caracterizar o que está a ser observado pelo radar (FA-

BRY, 2015).

A comparação entre os radares convencionais (polarização simples) e o polarimétrico dual é representado pela Figura 7. Nela é possível notar que, com o acréscimo da onda vertical pelo radar de dupla polarização, consegue-se ter uma nova perspectiva do hidrometeoro que não era possível com o radar convencional, amplificando a possibilidade em determinar o que cada hidrometeoro representa.



FIGURA 7: DIFERENÇA NA EMISSÃO E DETECÇÃO DE PARTÍCULAS ENTRE UM RADAR DE POLARIZAÇÃO SIMPLES E UM RADAR DE POLARIZAÇÃO DUPLA.

FONTE: Adaptado de MetEd (2014)

No radar polarimétrico tem-se duas possibilidades de polarização: copolarização (*copolar power*) e polarização cruzada (*cross-polar power*).

A copolarização emite e interpreta a onda recebida a mesma orientação, representada pela Figura 8: caso a onda for emitida na vertical, o radar somente irá interpretar parte da onda que retornou na vertical (FABRY, 2015).

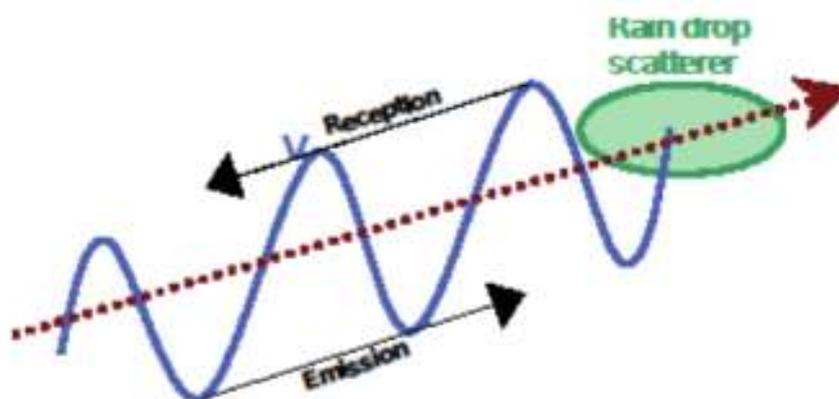


FIGURA 8: ESQUEMA DA COPOLARIZAÇÃO.

FONTE: Adaptado de CPTEC (2015)

A polarização cruzada ao invés de interpretar a onda emitida na mesma orientação, interpretará apenas a orientação contrária da emitida, representada pela Figura 9. Então, se a onda for emitida na vertical, irá interpretar a parte da onda que retornou na horizontal e vice-versa (FABRY, 2015).

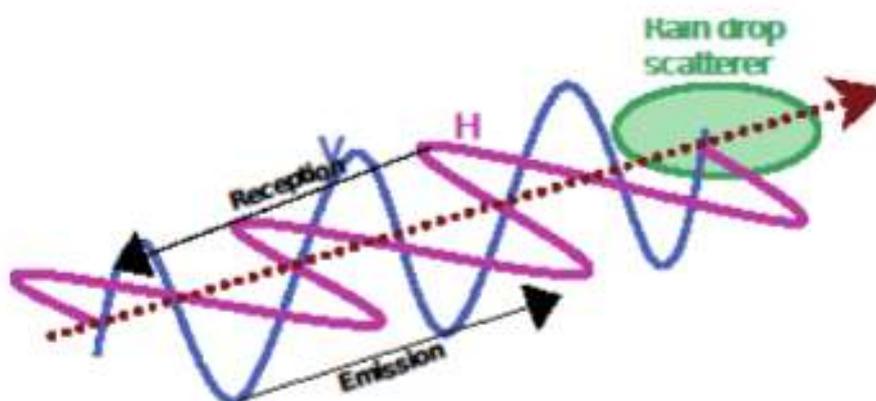


FIGURA 9: ESQUEMA DA POLARIZAÇÃO CRUZADA.

FONTE: Adaptado de CPTEC (2015)

Nem todos os radares polarimétricos possuem a capacidade de operar com a polarização alternada. Os modo de operação são descritos pelos momentos medidos e essa informação é localizada nos seus índices. No caso da refletividade (Z), se ela for expressa por Z_{HH} , tem-se que a onda foi emitida na horizontal e retornou na horizontal.

2.4 VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS

Com a adição da emissão das ondas eletromagnéticas na vertical, possibilitou-se o cálculo de novas variáveis com radar polarimétrico, dentre elas tem-se:

- Refletividade diferencial (Z_{DR});
- Correlação copolar (ρ_{HV});
- Diferencial de fase de propagação (Φ_{DP});
- Diferencial de fase específica (K_{DP}).

2.4.1 REFLETIVIDADE DIFERENCIAL

A refletividade diferencial, apresentada pela Figura 10, representa a razão entre a refletividade horizontal (z_{HH}) e a vertical (z_{VV}) (KNIGHT; VIVEKANANDAN; LASHER-TRAPP, 2002; SAUVAGEOT, 1992), sendo expressa pela equação 5:

$$Z_{DR} = 10 \log_{10} \left(\frac{z_{HH}}{z_{VV}} \right), \quad (5)$$

onde a unidade tanto da refletividade horizontal e a vertical, estão em mm^6/m^3 e os índices determinam como foi emitida e como retornou. Quando a refletividade é expressa na escala logarítmica, o cálculo da refletividade diferencial muda, tornando-se somente a diferença entre a refletividade horizontal (Z_{HH}) e a vertical (Z_{VV}) (KNIGHT; VIVEKANANDAN; LASHER-TRAPP, 2002), sendo expressa pela equação 6:

$$Z_{DR} = Z_{HH} - Z_{VV}. \quad (6)$$

Em ambos os casos, a unidade da refletividade diferencial é representada por dB. Ela contém informações sobre a forma das partículas, orientação e índice de refração, tornando-se útil para localizar o que representa chuva, granizo, neve, entre outras partículas (SAUVAGEOT, 1992; DOVIK; ZRNIC, 2006).

Por ser calculada diretamente da refletividade, Z_{DR} sofre com efeitos de propagação, como por exemplo atenuação, que precisa ser tratada na refletividade antes do cálculo do Z_{DR} , evitando futuros problemas (BRINGI; CHANDRASEKAR, 2001).

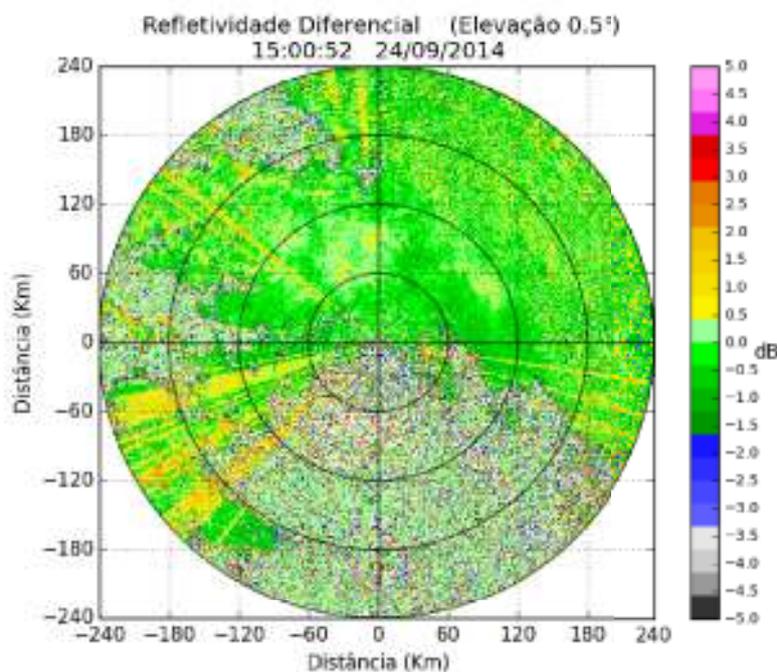


FIGURA 10: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: REFLETIVIDADE DIFERENCIAL. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

2.4.2 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COPOLAR

O coeficiente de correlação copolar (Figura 11) representa a correlação entre os sinais horizontais e verticais polarizados num determinado ponto no espaço exatamente ao mesmo tempo (RINEHART, 2004). O coeficiente de correlação copolar é definido pela equação 7:

$$\rho_{HV} = \frac{\langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{VV}|^2 \rangle^{1/2}}, \quad (7)$$

onde S representa a intensidade do sinal e S^* é o conjugado complexo da intensidade do sinal. Os índices representam a forma de emissão e de captação do sinal: no caso de S_{VV} , o sinal foi emitido verticalmente e recebido verticalmente. Por tratar-se de uma

correlação, ρ_{HV} não apresenta unidade.

Por ser calculado com base na da correlação dos sinais, o coeficiente de correlação copolar possui independência em relação a concentração de hidrometeoros na atmosfera e a efeitos de propagação. Possui dependência em relação as formas do hidrometeoros, suas inclinações e as misturas dos mesmos (BRINGI; CHANDRASEKAR, 2001).

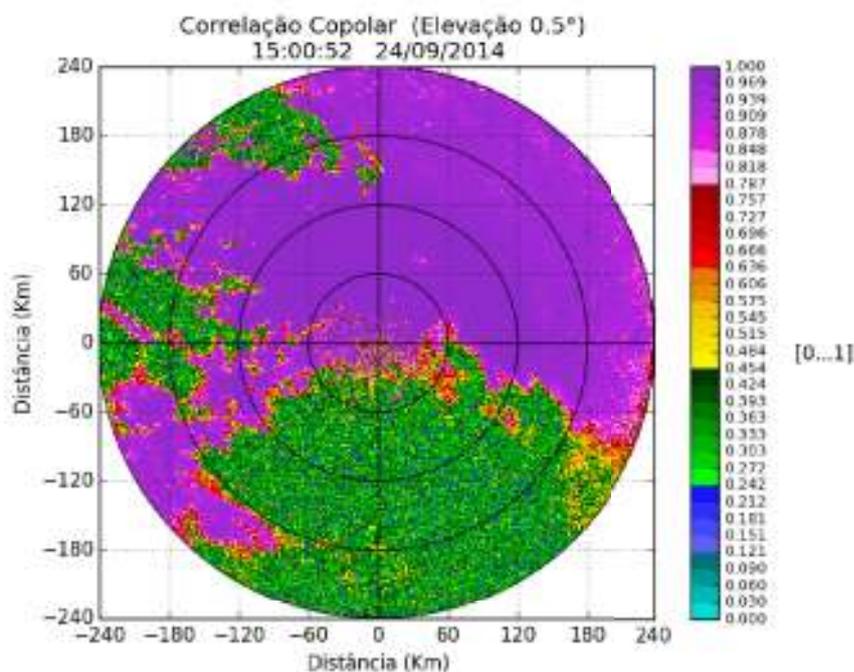


FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COPOLAR. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

2.4.3 DIFERENCIAL DE FASE DE PROPAGAÇÃO

O diferencial de fase de propagação (Figura 12) representa a diferença entre as fases para o trajeto completo do pulso (desde a sua emissão até o seu retorno) (FABRY, 2015), sendo descrito pela equação 8:

$$\phi_{DP} = \phi_{HH} - \phi_{VV}, \quad (8)$$

onde a unidade de ϕ_{DP} é dado por °(graus).

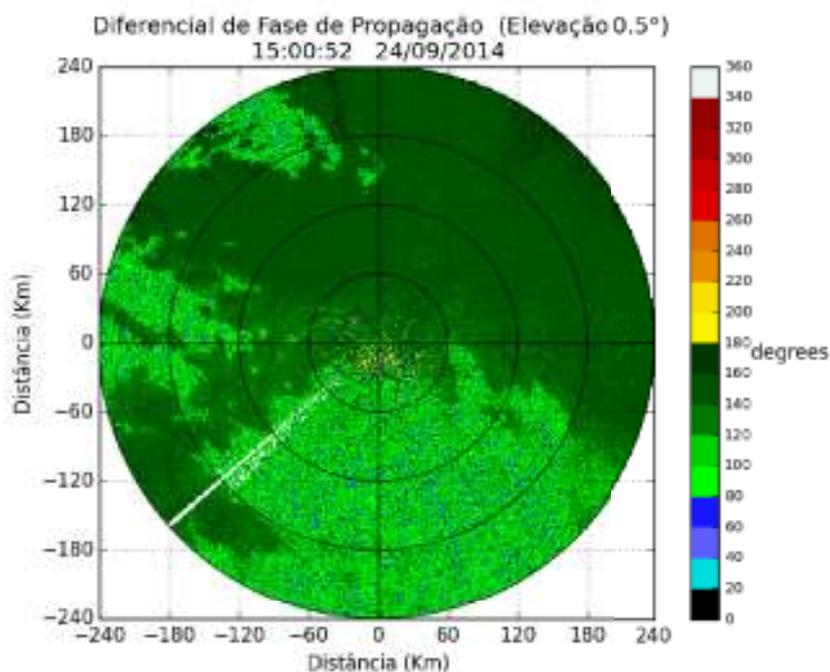


FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: DIFERENCIAL DE FASE DE PROPAGAÇÃO. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

2.4.4 DIFERENCIAL DE FASE ESPECÍFICA

O diferencial de fase específica (Figura 13) representa a derivada espacial de ϕ_{DP} (DOVIAK; ZRNIC, 2006), descrita pela equação 9:

$$K_{DP} = \frac{\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)}. \quad (9)$$

A multiplicação por 2, na equação 9, representa a dependência de K_{DP} do sinal emitido e do sinal retornado (RINEHART, 2004). A unidade é %/km (graus por quilômetro). O diferencial de fase específica é útil para a detecção de chuva misturada com granizo, pois o granizo é estatisticamente isotrópico ($K_{DP} = 0$).

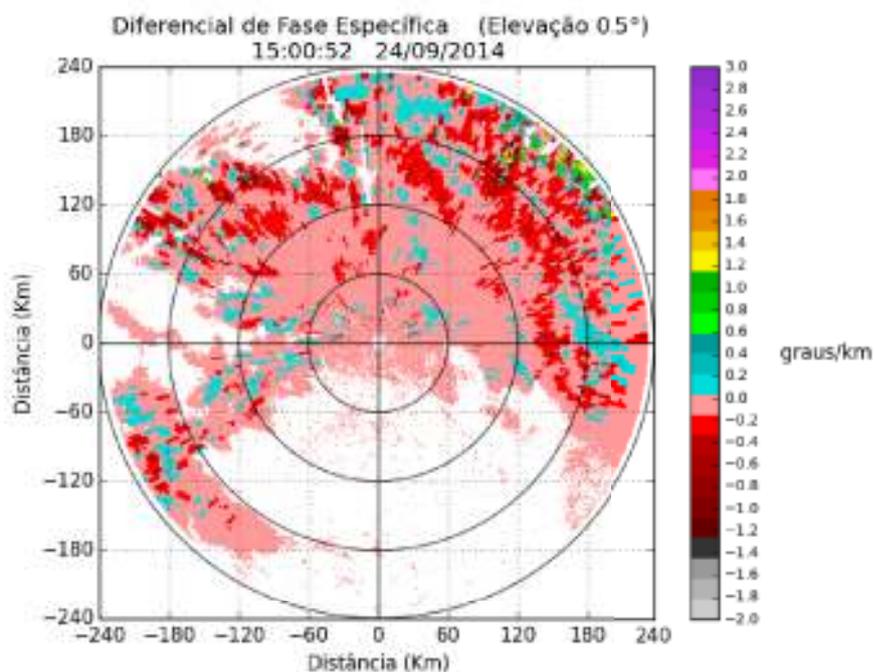


FIGURA 13: REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO: DIFERENCIAL DE FASE ESPECÍFICA. DADO DO RADAR DE CASCAVEL DO DIA 24/09/2014 ÀS 15H00MIN.

FONTE: O autor (2014)

A Tabela 1 apresenta alguns dos momentos medidos pelo radar polarimétrico e são atribuídos valores para alguns hidrometeoros. Os valores foram modificados para refletir as preferências e experiências de Rinehart (2004).

TABELA 1: REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS COM RELAÇÃO AO HIDROMETEOROS.

Momento	Unidade	Chuva	Neve	Granizo	Insetos	Aves
Z	dBZ	20 até 55	10 até 40	40 até 77	-30 até 25	-10 até 25
Z_{DR}	dB	0.5 até 4	0 até 3	-0.5 até 0.5	-3 até 10	-2 até 3
ρ_{HV}		>0.95	0.8 até >0.95	0.9 até 0.95	0.8?	0.9?
K_{DP}	°/km	0 até 10	0 até 2	-1 até 1	+	+?

2.5 RADAR UTILIZADO

O Simepar opera dois radares meteorológicos. O mais antigo deles, instalado no município de Teixeira Soares no estado do Paraná, em 1996, é um radar Banda-S de

polarização simples. O mais novo, instalado em 2013 no município de Cascavel no estado do Paraná, é um radar Banda-S de polarização dupla (Figura 14).

Em ambos os radares, o alcance máximo cobre praticamente todo o estado do Paraná e parte dos estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso do Sul e, ainda, parte dos países vizinhos Paraguai e Argentina. Esses radares funcionam continuamente, coletando informações de grande valor agregado na previsão meteorológica, no monitoramento de eventos severos, e no acompanhamento da entrada de sistemas frontais no Estado do Paraná.

Nesse trabalho foi utilizado os dados o radar de Cascavel. Nesse, a pelo menos cada sete minutos, é gerado um volume que pode conter milhões de pontos e cerca de vinte momentos associadas a cada ponto da grade tridimensional. Os dados coletados pelo radar de Cascavel são disponibilizados em formato NetCDF CF/Radial.



FIGURA 14: RADAR POLARIMÉTRICO DUAL DE CASCAVEL.

FONTE: JORNAL DO OESTE (2015)

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse Capítulo, foram apresentados aspectos sobre radares meteorológicos, seu funcionamento e produtos. Foram apresentadas diferenças entre os radares de polarização simples e de polarização dupla, dentre algumas diferenças, foram descritos os modos de operação, novos momentos, e como essas novas informações adqui-

ridas pelos radares de dupla polarização podem ser relevantes para determinar os hidrometeoros.

Por fim, foi descrito o radar utilizado para o trabalho. O radar de Cascavel, que por ser um radar de polarização dupla, apresenta maior gama de informações sobre as quais ainda não se tem o conhecimento de como podem auxiliar no trabalho do meteorologista, para serem estudadas por meio do sistema interativo, descrito no Capítulo 3.

3 O VISUALIZADOR INTERATIVO RADEX

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na comunidade científica que estuda radar meteorológico, existe a necessidade de novas ferramentas para visualização de dados de radar para melhor identificação e compreensão dos eventos. Trabalhos como de Beneti et al. (2014, 2015), Buriol e Beneti (2014a, 2014b), Buriol et al. (2015), Seluzniak et al. (2015a), oferecem ideias para novas ferramentas de visualização visando apoiar o analista na tomada de decisões e conclusões rápidas e evitando esforço no entendimento dessas ferramentas.

Neste Capítulo é descrito o visualizador interativo RADEX, com descrição da motivação para o seu desenvolvimento, suas funcionalidades e como as mesmas podem ajudar os meteorologistas nos tempos atuais.

3.2 RADEX

A visualização de dados de radares meteorológicos auxilia o analista a identificar a entrada de sistemas frontais e eventos severos, dando importante suporte cognitivo à avaliação e à tomada de decisões. Mas, esses sistemas têm mantido alguns padrões de interface e funcionalidades que têm persistido por muitos anos.

A quantidade de informações geradas pelos radares aumentou, em muitos casos, mais de cinco vezes. Ocorreu significativo aumento do interesse por soluções que permitam analisar e extrair mais rápida e facilmente informações relevantes a partir desses dados (BENETI et al., 2014). Neste sentido foi desenvolvido um *software* com o intuito de suprir as necessidades do meteorologista.

A produtividade e expressividade das linguagens dinâmicas se encaixam perfeitamente com metodologias ágeis, que nasceram do desenvolvimento de *software* de

código aberto e defendem um enfoque mais pragmático no processo de criação e manutenção de *software* (TORY; MÖLLER, 2004) do que as metodologias mais tradicionais. Assim, foi desenvolvido o sistema RADEX (*radar data explorer*), para trabalhar tanto com dados de radares de simples e de dupla polarização, reduzir o tempo gasto para manusear sistemas de visualização, ler vários formatos de arquivos e evitar trabalhos repetitivos focando em funcionalidades novas que podem oportunizar o meteorologista (HEISTERMANN et al., 2015).

O sistema RADEX foi desenvolvido em Python (BURIOL et al., 2015), que é uma linguagem de programação conhecida por ser versátil, possuir uma vasta biblioteca padrão, além de módulos de terceiros e, também, por ser de fácil aprendizagem. Assim, buscando um equilíbrio entre esforço demandado para o desenvolvimento e o desempenho final do aplicativo, optou-se por utilizar, além da linguagem Python, os pacotes Pygame, Numpy, Py-ART e PyVTK. A ideia do RADEX é ser um *open source software* para radares meteorológicos (HEISTERMANN et al., 2015). O RADEX foi testado nos sistemas operacionais Linux e Mac. Em ambos teve êxito na sua operação. O sistema operacional Windows não foi testado, pois o pacote Py-ART não tem suporte para o sistema.

3.3 PYTHON

Python é linguagem de altíssimo nível, orientada a objeto, interpretada e interativa. Ela foi desenvolvida nos anos 90 usando linguagem C por Guido van Rossum, no Instituto Nacional de Pesquisa para Matemática e Ciência da Computação da Holanda(CWI).

Python é linguagem de código aberto, podendo ser utilizada em várias plataformas (Linux, Mac, Windows, celulares, entre outros). Python possui uma sintaxe clara e concisa (BORGES, 2010), que favorece a legibilidade do código fonte, tornando a linguagem mais produtiva (LIN, 2012), além de ser uma linguagem simples para aprender.

A linguagem inclui diversas estruturas (dicionários, listas, classes, entre outras) e uma vasta coleção de módulos prontos para uso, além de *frameworks* de terceiros que podem ser adicionados. A linguagem é interpretada por meio de *bytecode* pela máquina virtual Python, tornando o código portátil. Com isso é possível compilar aplicações em uma plataforma e executar em outros sistemas operacionais ou executar direto do código fonte.

Essas e outras vantagens, chamaram atenção de empresas para utilizarem Python, como Google, Nokia, Nasa, Philips e Yahoo (PYTHONOLOGY, 2015).

Python também possibilita a integração com outras linguagens, como C, Fortran, Java. Com isso, é possível fazer o desenvolvimento de aplicações híbridas que unem código em Python e outra linguagem. São algumas destas formas de integração: Cython (Python para C/C++), Jython (Python para Java) e F2py (Python para Fortran).

3.3.1 PYGAME

Pygame é um pacote multiplataforma para o desenvolvimento de jogos, que funciona em uma camada sobre a biblioteca SDL (*Simple DirectMedia Layer*). Esta última, é uma biblioteca multimídia livre e de código aberto, escrita em C (tornando mais rápido que em Python, em aproximadamente 10 a 20 vezes), que representa uma interface simples para acesso direto ao *hardware* gráfico, de áudio, e dispositivos de entrada de várias plataformas (WANG, 2009). Por ser destinada ao desenvolvimento de jogos, Pygame também é adequado para o desenvolvimento de sistemas de visualização interativos, proporcionando um conjunto de funções convenientes para o desenvolvimento de controles gráficos e mecanismos de interação (JONES, 2005; MCGUGAN, 2007).

Alguns fatos sobre Pygame:

- Não requer uma GUI (*Graphical User Interface*) para usar todas as funções. É possível usar Pygame sem um monitor, como se fosse usá-lo apenas para processar imagens, obter a entrada do *joystick* ou reproduzir sons;

- CPUs *multi-core* podem ser usados facilmente. Com CPUs *dual core* comuns, e CPUs de 8 núcleos disponíveis em sistemas *desktop*, fazendo uso de múltiplas CPUs núcleos, permitindo que o usuário faça mais em seu jogo;
- Não requer OpenGL. O Pygame usa o seu próprio OpenGL, DirectX windib, X11, *frame buffer* Linux, além da arte ASCII, evitando possíveis conflitos.

3.3.2 NUMPY

Numpy é o pacote básico para computação científica e processamento numérico em Python. Possui estruturas de dados que permitem trabalhar com arranjos, vetores e matrizes de N dimensões com consideráveis eficiências e conveniências (COELHO, 2007). Provê funções e operações sofisticadas, realizadas por códigos compilados escritos em C, o que garante um desempenho superior se comparado às operações com vetores originais do Python.

O uso de Numpy proporciona algumas conveniências em relação à produtividade, reduzindo consideravelmente o esforço de programação, uma vez que dispõe de inúmeras funções para manipulação de vetores multidimensionais e rotinas de álgebra linear (MCKINNEY, 2013).

Numpy tornou-se o padrão para representação de dados numéricos em Python, pois possibilita a implementação eficiente de algoritmos de processamento numérico em uma linguagem de alto nível. O ganho de desempenho é devido, em geral, ao uso de três técnicas: minimização do número de operações aritméticas (WALT; COLBERT; VAROQUAUX, 2011), cálculos vetorizados e o acesso aos dados na memória sem a necessidade de copiar. Em sua essência, no entanto, um Array do Numpy é apenas uma forma conveniente de descrever um ou mais blocos de memória do computador, de modo que os números representados possam ser facilmente manipulados (IDRIS, 2011).

3.3.3 PY-ART

Py-ART é um pacote Python que contém uma coleção de algoritmos de radar meteorológico e utilitários. Py-ART é utilizado pelo *Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Climate Research Facility* para trabalhar com dados a partir de um número de precipitação, mas foi projetado para que ele possa ser utilizado por outras comunidades de pesquisas para examinar processos e analisar dados de muitos tipos de radares meteorológicos.

Py-ART tem a capacidade de ler vários formatos de radar meteorológico, tais como o Sigmet/IRIS, MDV, CF/Radial, UF, NEXRAD e NetCDF convertido para CF/Radial (HEISTERMANN et al., 2015). Py-ART possui rotinas que podem gerar imagens de radar, entre elas tem-se PPIs e RHIs, além de possibilitar ao usuário utilizar algoritmos de correção de dados (atenuação) entre outras funcionalidades aproveitando módulos Python como Scipy, Numpy, Matplotlib (HELMUS et al., 2013).

A vantagem de usar o Py-ART em vez de vários módulos, um para cada formato, é a padronização. Essa padronização, evita complexidade no código e ganha nos quesitos de otimização e simplicidade do programa, melhorando o desempenho do RADEX.

3.4 FUNCIONALIDADES DO RADEX

Visando proporcionar ao usuário uma experiência de análise de dados fluida, por meio de uma interface simples e mecanismos de interação eficazes, adotou-se a abordagem de geração de produtos de visualização “sob demanda” (SELUZNIAK et al., 2015a). Este tipo de visualização tem como princípio o processamento dos dados e a geração das imagens (produtos de visualização) à medida que o usuário solicita ao sistema. Isso ocorre de forma interativa, evitando gargalos por trabalhar com visualização de grandes quantidades de dados (QI, 2008). Todos os produtos de visualização são guardados em um conjunto de recipientes (dicionários) Python, possibilitando a

comparação interativa dos produtos sem a necessidade de reprocessamento, fazendo buscas nos dicionários.

O armazenamento em dicionários mostrou-se promissor para suprir a necessidade dos desenvolvedores de *software* em possibilitar o equilíbrio entre a usabilidade e UX (*user experience* ou experiência do usuário) (PADOVANI; SCHLEMMER; SCARIOT, 2012; KETOLA; ROTO, 2009). A usabilidade representa a capacidade de um sistema permitir que usuários específicos atinjam metas específicas com eficácia, eficiência e satisfação em contextos específicos de uso, enquanto o UX representa as percepções e respostas dos usuários resultantes do uso e/ou antecipação do uso de um produto, sistema ou serviço.

No desenvolvimento de um *software* deve haver harmonia entre usabilidade e UX, e, com a ajuda de dicionários Python, foi possível melhorar a interação, com isso aprimorar a experiência de navegação, alternando entre diferentes produtos de visualização. Com eles, a busca num recipiente possui um custo computacional menor que o reprocessamento, podendo chegar em alguns casos a até 200 ms (milissegundos) e possibilitando uso de *hotkeys* (atalhos no teclado) para simplificar a comparação de dados, em vez de abrir vários menus para realizar a mesma operação (BURIOL; BENETI, 2014a). As comparações aqui citadas incluem visualizar diferentes imagens alternadamente de forma rápida suficiente para identificar diferenças visíveis.

Buscando novas alternativas para interação com os dados e visando à usabilidade, cada funcionalidade é representada por um botão sem a necessidade de consultar um menu com abas e várias opções para retornar somente uma funcionalidade. Estes botões da janela de visualização fazem parte da GUI. A GUI é representada pela camada gráfica do sistema, possibilitando o usuário interagir com o sistema.

Para o RADEX, optou-se ocultar os menus e mostrar somente quando solicitado, ou seja, somente quando o cursor do *mouse* aparecer na região dos botões (menu). Para isto, é calculada a posição do (cursor do) *mouse* em relação ao Pygame (posição (x,y)) e, caso o (cursor do) *mouse* esteja sobre a região do menu, ele se torna visível

para o analista. Caso contrário, o menu mantém-se ocultado, reduzindo o conteúdo de informação não utilizada no sistema. Esse tipo de interface, proporciona menor esforço cognitivo exigido pela interface e dá ao usuário a capacidade de tomar decisões e conclusões rápidas e eficazmente.

Para mostrar as informações do dado de radar de maneira simplificada para o usuário, é utilizado um HUD (*Heads-Up Display*). O HUD é qualquer elemento gráfico exibido na tela para transmitir informações ao usuário do sistema. No RADEX, as informações vão desde data e o horário do dado lido, até latitude e longitude de acordo com a posição do mouse na tela. Algumas opções podem ser ocultas ou não, que são representadas pela HUD. Ao pressionar um botão, essas informações são ocultas ou reveladas na tela, proporcionando melhor experiência do analista com o sistema.

Nas seções seguintes são apresentadas algumas ferramentas disponíveis no sistema RADEX (Figura 15).

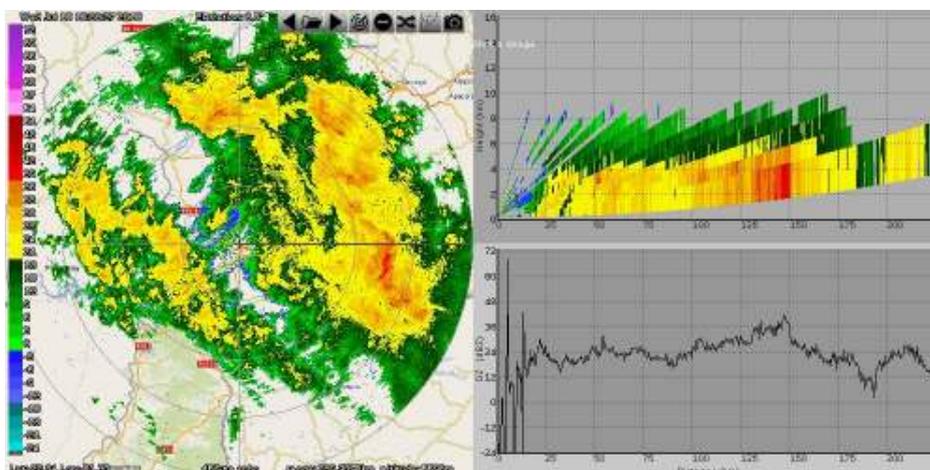


FIGURA 15: INTERFACE DO RADEX.

FONTE: O autor (2015)

3.4.1 PPI

Entre as principais funcionalidades do RADEX está a visualização do dado de radar no formato PPI. Para realizar esta visualização, primeiramente é calculado o

alcance do radar com relação a superfície da terra (HEYMSFIELD; GHOSH; CHEN, 1983) representado como “s” na fórmula descrita pela seguinte equação:

$$s = R' \tan^{-1} \left(\frac{r \cos \theta \phi}{R' + r \sin \theta \phi} \right), \quad (10)$$

onde R' representa o raio da terra (8500000 metros), r o alcance do radar em metros e ϕ o ângulo do radar em graus. Com o valor calculado é possível a criação de uma grade quadrada com resolução de tela do Pygame para a geração do PPI, porém, por causa da curvatura de terra, é necessário fazer algumas correções para a correta aplicação no Pygame.

Aplicadas as correções, é possível adicionar os valores corretos na grade. Todos os pontos (*pixels* no Pygame) adicionados passam pela verificação de valor para determinar se estão dentro do intervalo do valor do momento solicitado. Caso os valores estejam dentro do intervalo, são coletados os valores RGB (sistema de cores, baseado em tons de vermelho, verde e azul) para cada valor do ponto da grade (SWEIGART, 2012).

Após aplicar as cores na superfície conforme descreve Sweigart (2012), ela é salva e a matriz que possui a grade é removida da memória, para evitar excesso de informação nos dicionários, pois pode ser facilmente recalculada. A informação do valor de cada *pixel*, é coletada conforme a posição do mouse na superfície. Para cada ponto (x,y) da tela realiza-se a conversão deste ponto para a coordenadas esféricas (θ, r, ϕ) . A coordenada esférica é formada pelos seguintes parâmetros: θ representa o ângulo de azimute do radar, r representa a distância da partícula com relação ao radar (*bin*) e ϕ representa ângulo de elevação da antena do radar (BONATO, 2014).

No PPI, cada valor do momento que se deseja visualizar é atribuído a uma área definida por um retângulo polar (Figura 16). Quanto mais próximo do radar, menor é a área desse retângulo, e, portanto, a resolução dos dados é maior nas proximidades do centro do PPI (BURIOL et al., 2015).

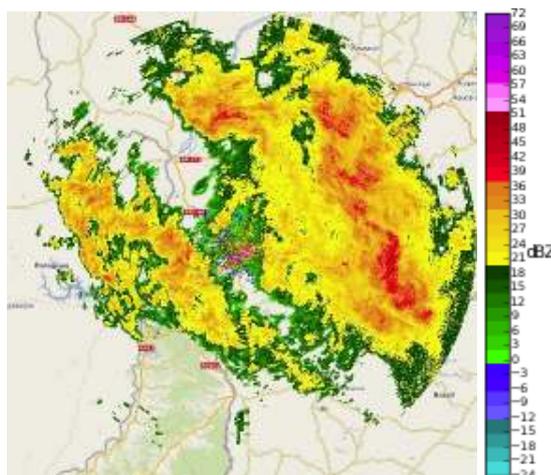


FIGURA 16: PPI PARA REFLETIVIDADE GERADA NO RADEX.

FONTE: O autor (2015)

3.4.2 CORTE VERTICAL E ASCOPE

Sobre um PPI, o usuário pode traçar um segmento de reta arbitrário e rapidamente visualizar um corte vertical no volume de dados. Isso permite o analista explorar o interior do volume de dados e possibilita obter informações sobre a forma das células de tempestade, e, com isso, avaliar a situação para a tomada de decisão. Adicionalmente, ao posicionar o *mouse* sobre a linha do corte, é mostrada uma linha vertical na imagem do corte, o que permite ter percepção acurada da posição sobre o mapa da projeção da linha vertical. Também, é mostrado dinamicamente, ao desenhar a linha do corte, o tamanho correspondente (em km) do corte sobre o mapa.

Sobre a superfície do corte vertical, existe a necessidade de determinar a altitude correta de cada *pixel* que está no segmento de reta. Para isto, foram usadas as relações da Figura 17. Com elas, a posição de cada *pixel* pode ser convertida para coordenadas do radar, possibilitando o cálculo de “S” (arco que liga o radar à projeção do hidrometeoro) e “h” (altura). Com “S” e “h”, é viável encontrar o valor de “ r_0 ”, “ h_0 ”, “ λ ”, “ β ”. Com todas essas variáveis encontradas, obtêm-se “r” e “ h_1 ”, elementos necessários para corrigir a altitude e selecionar os valores corretos na matriz de dados, para enfim, esquematizar corretamente o corte vertical, representado pela Figura 18(a).

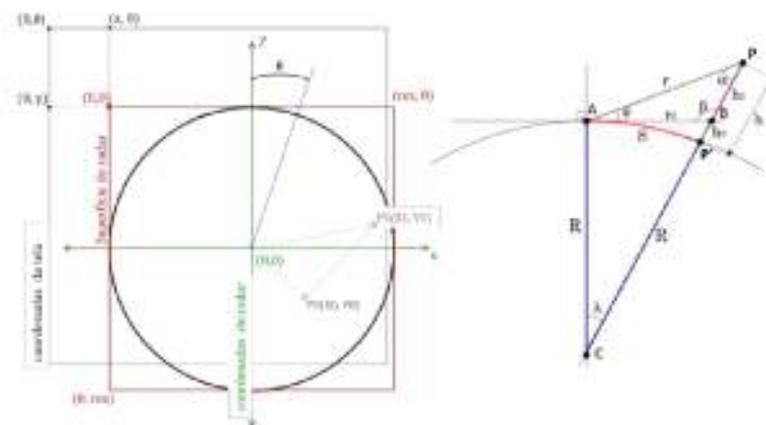
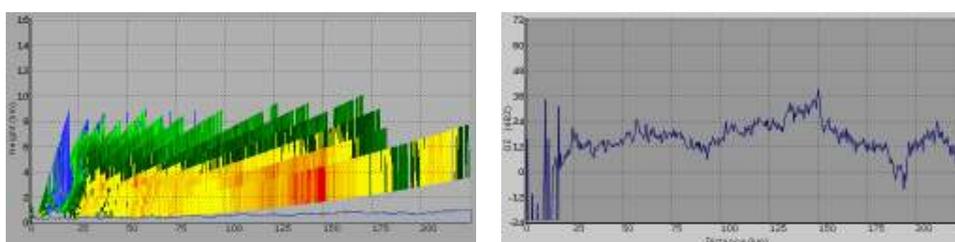


FIGURA 17: CONVERSÃO DE COORDENADAS NECESSÁRIA NA CORREÇÃO DO CÁLCULO DA ALTURA PARA O CORTE VERTICAL.

FONTE: O autor (2015)

O Ascope (Figura 18(b)) é o gráfico da relação entre os valores dos pontos coletados e suas distâncias. Este gráfico é realizado segundo a elevação atual. Os valores coletados para realizar o Ascope são decorrentes do segmento de reta gerado pelo usuário.

Por ser calculado de acordo com elevação, o Ascope é calculado conforme a troca de elevação, o que não ocorre com o corte vertical, que é alterado somente quando realizado novo segmento de reta.



(a)

(b)

FIGURA 18: REPRESENTAÇÃO DO CORTE VERTICAL E DO ASCOPE.

FONTE: O autor (2015)

3.4.3 GRÁFICO DE DISPERSÃO E PERFIL VERTICAL

Para visualizar correlações entre momentos, foi adicionada uma ferramenta que gera o gráfico da dispersão que compara dois momentos diferentes em uma região determinada pelo usuário. Esta seleção de região quadrada é disponibilizada por meio da tecla "C". Presionado a tecla, alternam-se entre o segmento de reta e a área quadrada. Ao determinar a região, será criada uma matriz com as coordenadas (x,y) do Pygame, as quais são convertidas para coordenadas do volume do radar, a fim de determinar quais são os valores selecionados pela região em questão.

Junto com o gráfico de dispersão, é realizado o perfil vertical dos dados (Figura 19). O cálculo é feito dentro do mesmo intervalo determinado pelo analista. O perfil vertical corresponde à média dos valores do momento com relação à altitude no volume de dados (ANDRIEU; CREUTIN, 1995). Quando realizadas essas funcionalidades, o perfil vertical utiliza as contas que foram realizadas com relação à conversão de coordenadas do gráfico da dispersão, evitando o retrabalho, pois os dois gráficos são feitos simultaneamente e suas regiões são as mesmas.

Essas novas visualizações do dado possibilitam ao analista uma maneira alternativa de explorar o fenômeno, no intuito de entender melhor o que se passa em tal região. Usar o gráfico da dispersão para comparar dois momentos onde se possui conhecimento prévio de pelo menos um deles possibilita entender o que pode representar o outro momento, e o que os valores desse momento podem significar para célula em questão.

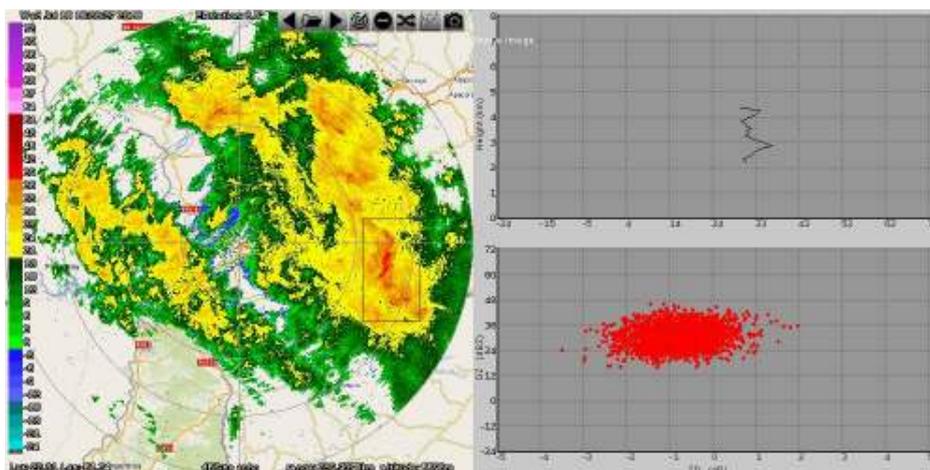


FIGURA 19: GRÁFICO DE DISPERSÃO (PARA REFLETIVIDADE E REFLETIVIDADE DIFERENCIAL) E PERFIL VERTICAL (PARA REFLETIVIDADE).

FONTE: O autor (2015)

3.4.4 A FUNÇÃO CORTINA

Como alternativa à visualização lado a lado para comparação de dois momentos, além de outras finalidades, foi desenvolvida a “função cortina” (nome dado devido à semelhança com o abrir e fechar de uma cortina). O efeito é obtido pela sobreposição de duas imagens, em que uma linha vertical divide a visualização, à direita é mostrada a imagem de um momento e à esquerda de outro. A linha pode ser movimentada com o *mouse*.

Essa ferramenta tem se mostrado muito útil para verificar a incidência de chuva em uma região específica de interesse, por exemplo, verificar se uma célula de tempestade encontra-se sobre uma cidade, comparar dois momentos diferentes ou visualizar a região topográfica sobre os dados (Figura 20). A função é acionada segurando o botão do mouse pressionado sobre o botão na tela correspondente a um novo momento a ser visualizado (Figura 21) e, então, movimentando o mouse. A “função cortina” se aplica tanto no PPI como no corte vertical. Mas, se sua ativação se passa na superfície do PPI, será ativado a mesma para o corte vertical, quando o cursor do mouse passar pelo menos em uma coordenada (x) semelhante ao do corte feito.



FIGURA 20: CORTINA UTILIZADA PARA LOCALIZAÇÃO EXATA DA CÉLULA QUE ESTÁ SENDO ESTUDADA.

FONTE: O autor (2015)

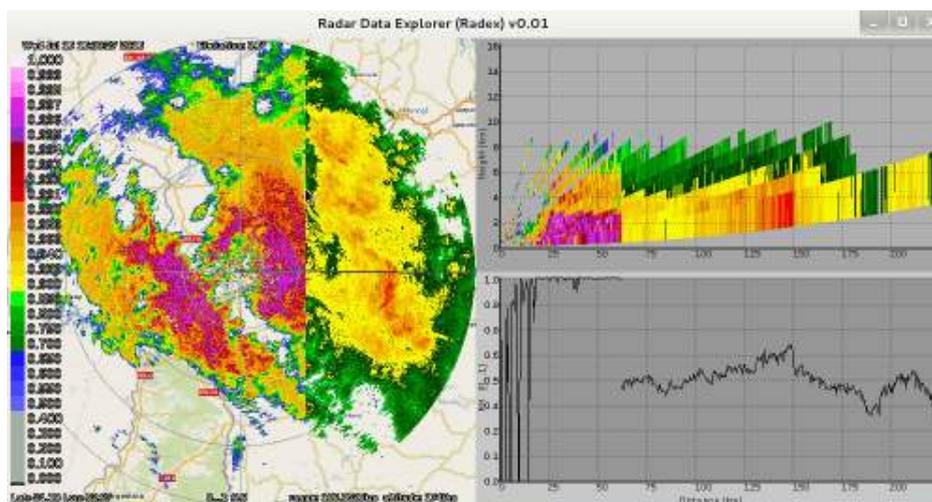


FIGURA 21: CORTINA UTILIZADA PARA COMPARAÇÃO DE DOIS MOMENTOS DISTINTOS, NO CASO A REFLETIVIDADE E A CORRELAÇÃO CO-POLAR.

FONTE: O autor (2015)

3.4.5 CORTE RADIAL

Outra funcionalidade disponibilizada pelo RADEX é a visualização interativa de cortes radiais, em que o usuário pode visualizar de forma dinâmica um conjunto de cortes radiais pré-processados (Figura 22). O usuário seleciona um setor circular no PPI e os cortes verticais na direção radial são gerados. Então, o usuário pode passar

o mouse e alternar a visualização dinamicamente e, dessa forma, explorar o interior do volume de dados. A visualização funciona como uma animação, controlada pelo movimento do mouse. Assim, o usuário tem a liberdade de analisar somente a região de seu interesse em forma de animação.

O setor circular é baseado no seu ponto inicial, ponto final e sua direção, com isso, são evitados problemas na realização dos cortes verticais, podendo ser feito cálculos para região complementar à região. Para isto, são feitos alguns testes para determinar a direção correta da setor circular escolhido pelo usuário, comparando os ângulos captados no setor, o ângulo final, o ângulo inicial e se no setor escolhido pelo usuário, existe ângulos do primeiro e quarto quadrante.

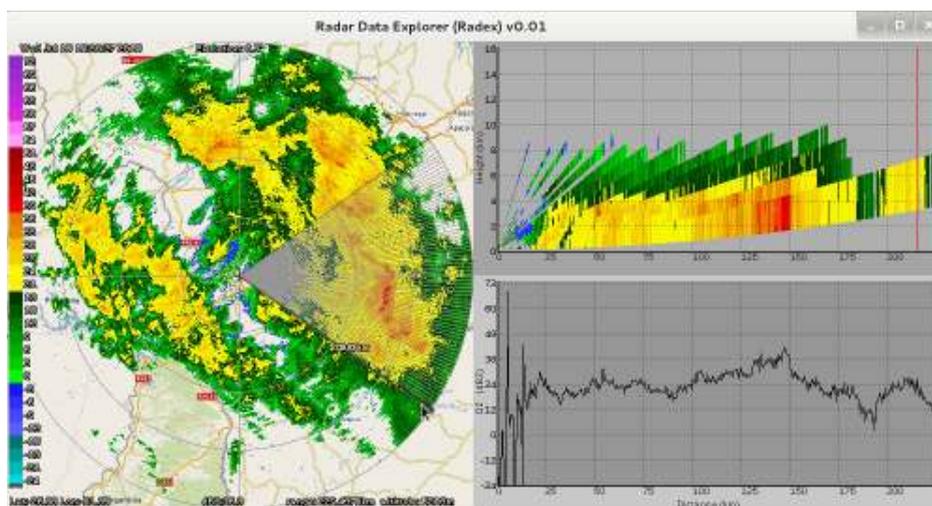


FIGURA 22: SELEÇÃO DOS ÂNGULOS PARA A REALIZAÇÃO DO CORTE RADIAL.

FONTE: O autor (2015)

3.4.6 THRESHOLD

Para observar somente regiões que apresentam grau de significado maior que outras regiões, foi desenvolvido o *Threshold* (limiar) interativo (Figura 23), que possui como objetivo, remover valores menos significativos da imagem, sem alterar o dado e sem tempo de espera. Esta operação pinta os *pixels* de outra cor, a fim de que eles não apareçam no visualizador, evitando o reprocessamento dos dados, toda vez que é feita esta operação. Para isso, é usada a função do Pygame: `PixelArray` (SWEIGART,

2012), que permite alterar as cores dos pixels para que eles apareçam ou não no visualizador. Desta forma, o analista tem a liberdade de escolher o intervalo onde contém apenas as informações mais relevantes no dado de radar.

A execução dessa função é simples, com o botão *scroll* do mouse, é possível definir o intervalo de cores que irá aparecer no RADEX. Para isso, é necessário estar com o mouse em cima do *colorbar* e usar o *scroll* para determinar o intervalo, conforme é alterado o intervalo no *colorbar*, é mostrada uma barra que determina o intervalo em questão. Quando realizado o *Threshold*, tanto o PPI quanto o corte vertical são alterados para o novo intervalo, definido pelo usuário.

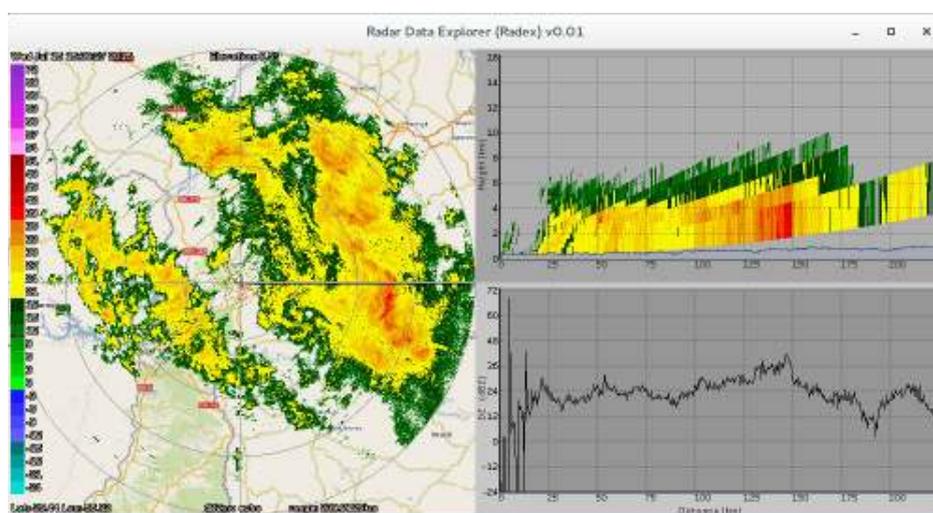


FIGURA 23: THRESHOLD PARA VALORES DE REFLETIVIDADE 12 DBZ.

FONTE: O autor (2015)

3.4.7 ZOOM E PAN

Como existem áreas que, dependendo das condições do tempo, necessitam de um estudo a parte, foram desenvolvidas as opções de *Zoom* e *Pan*. Com elas, o usuário consegue estudar somente a região ampliada e posicionada conforme necessidade do usuário, em vez de visualizar o dado por completo e localizar visualmente a região em questão a partir de uma imagem poluída com áreas que não tem a necessidade de olhar.

Com o *Zoom*, o analista pode aproximar e afastar a imagem que necessita para

realizar o estudo. A superfície onde está o PPI possui duas superfícies, uma com a região PPI e outra com todo PPI (no começo ambos são iguais), isso é feito para quando for realizado o *Zoom*, seja mostrada a superfície com todo PPI, com uma menor resolução (JOHNSON, 2004) até que o *Zoom* seja processado.

Após o término do zoom, será recalculada a superfície que contém PPI para somente a região vista, sempre que for feito, o *Zoom* será substituído por todo PPI, e conforme for utilizada a função, a resolução pode diminuir ou aumentar, afastando ou aproximando o PPI. Para realizar o *Zoom*, basta usar o botão *scroll* do mouse na superfície do PPI.

O Pan desloca o PPI para um novo local. Para realizar tal funcionalidade, deve-se segurar o botão *scroll* do mouse e mover o PPI para o local desejado.

Combinando as duas funcionalidades (*Zoom* e *Pan*), tem-se uma ferramenta muito poderosa, onde é criada a possibilidade de estudar regiões específicas podendo retornar para todo PPI conforme a necessidade (Figura 24). Por exemplo, para os tornados que atingiram a região do Paraná no ano de 2015, a combinação se torna muito útil, pois é possível utilizar o *Pan* e o *Zoom* para posicionar o PPI somente sobre a região onde ocorreu o tornado, e possibilitar melhor condição para o estudo da região.

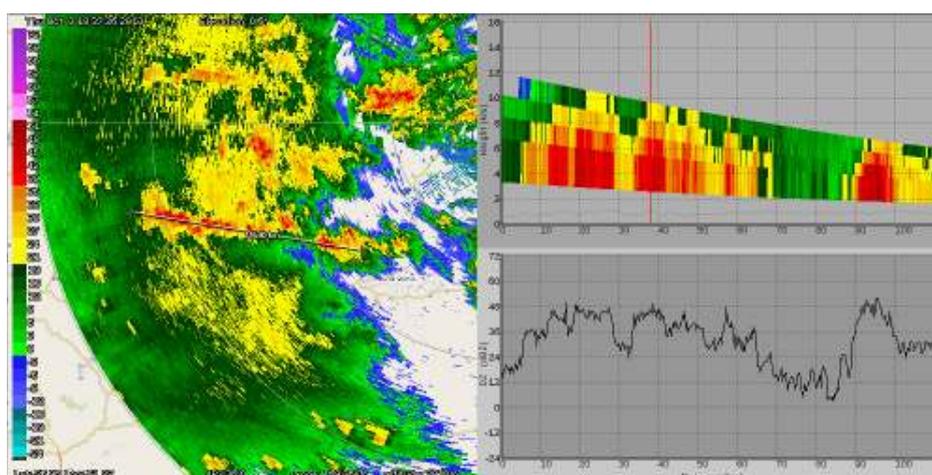


FIGURA 24: APLICAÇÃO DO ZOOM E PAN PARA SELEÇÃO DE REGIÃO ESPECÍFICA.

FONTE: O autor (2015)

3.4.8 MOUSE

Muitas das funcionalidades são ativadas com o mouse: corte vertical, seleção da área para gráfico da dispersão e perfil vertical, *Threshold*, "cortina", *Zoom*, *Pan*, seleção e coleta dos dados. Por exemplo, quando o cursor do mouse está na tela do PPI, ele coleta informações sobre os valores do dado de radar, a distância do pixel até o radar, o cálculo da latitude e a longitude do pixel. Para a realização dessas funcionalidades que são proporcionadas pelo mouse, é necessário fazer a conversão das coordenadas do mouse (x,y) com relação ao Pygame, para coordenadas do volume dos dados (θ,r,ϕ) .

No caso do mouse estar sobre a superfície do corte vertical, é coletado o valor do ponto mostrado, tal como é feito para coletar o valor do ponto do PPI, no caso do PPI, a elevação é constante e, no caso do corte vertical, o que se torna constante é o raio (azimute).

Para evitar a excesso de informações da tela do visualizador, funcionalidades ficam ocultas e são reveladas somente quando o mouse passa em cima dessas regiões, uma delas é o menu (GUI) que apresenta várias funcionalidades, entre elas:

- Opção de abrir novos arquivos (*online* e *offline*);
- Trocar entre arquivos que já foram visualizados;
- Ativar o corte radial;
- Tirar uma foto (*printscreen*) do visualizador;
- Alterar a polarização (horizontal par vertical e vice versa);
- Realizar o gráfico da dispersão junto com o perfil vertical;
- Mostrar as opções de todos os momentos presentes no dado de radar.

3.4.9 VISUALIZAÇÃO 3D

Uma funcionalidade que ainda encontra-se em desenvolvimento é a seleção de uma região de interesse e a visualização 3D do volume (ERNVIK, 2002; OLIVEIRA JR.; SCHEER; SATO, 2014) por meio de técnicas de visualização científica para campos escalares. Dentre as técnicas que estão sendo implementadas estão a visualização volumétrica e a extração de isosuperfícies. Para isto, é utilizada a mesma função de seleção de região apresentada para gráfico da dispersão e o perfil vertical. Para a visualização da área selecionada, é criado um hexaedro correspondente medidas da área. A representação do volume é descrita somente nas laterais do hexaedro pelo corte vertical (Figura 25). Para a visualização 3D, está sendo utilizado o pacote PyVTK, o qual permite o uso de Python para acessar funções do pacote VTK (VTK, 2014).

O *Visualization ToolKit* (VTK) é um sistema de código aberto para computação gráfica 3D, processamento de imagens e visualização, usado por milhares de pesquisadores e investigadores em todo o mundo inclusive no desenvolvimento de aplicações comerciais (SCHROEDER; AVILA; HOFFMAN, 2000). VTK provê uma variedade de representações de dados incluindo conjuntos de pontos desorganizados, dados poligonais, imagens, volumes, e também malhas estruturadas, retilíneas e não-estruturadas (BURIOL, 2006).

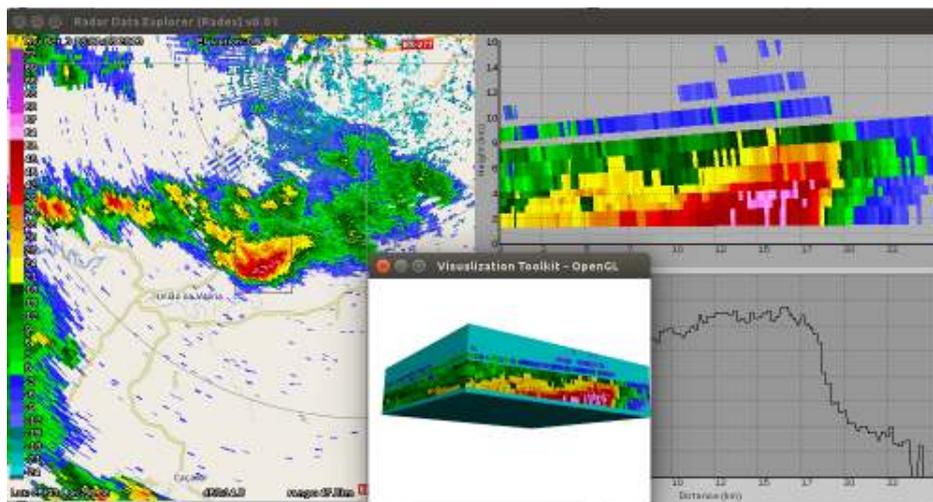


FIGURA 25: VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA REGIÃO DELIMITADA PELO USUÁRIO.

FONTE: O autor (2015)

3.4.10 HISTOGRAMA

No intuito de aumentar as possibilidades de analisar o dado de radar, foi implementada a opção de histograma, que representa a frequência de certos valores, possibilitando contabilizar o número de ocorrências de cada valor, representado pela Figura 26. Por meio do qual, é possível ter uma porcentagem dos valores apresentados no PPI. Visando otimização de código e de processamento, utilizou-se o pacote Numpy para o cálculo do histograma. A opção de visualização do histograma, pode ser feita por meio da tecla "H", alternando entre Ascope e histograma.

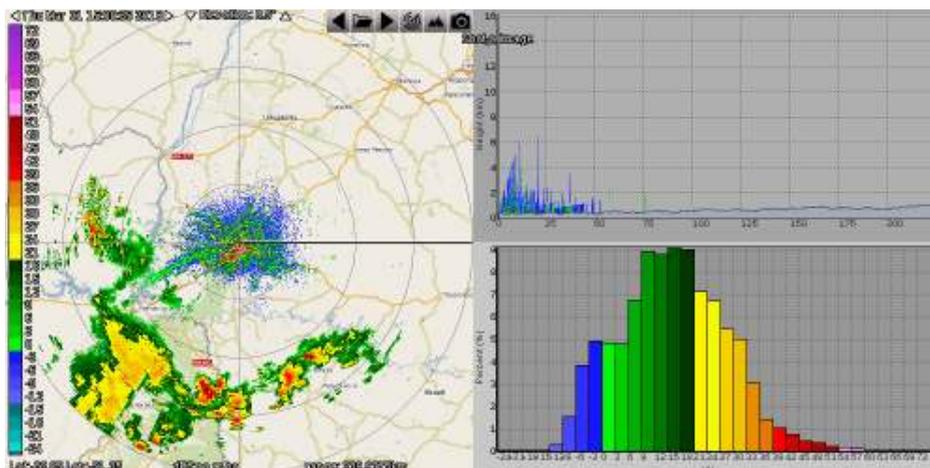


FIGURA 26: REPRESENTAÇÃO DO HISTOGRAMA NO RADEX.

FONTE: O autor (2016)

O histograma concorda com os valores dos *pixels* visualizados no PPI, sendo modificado com a utilização do *Zoom* e *Pan*, de maneira interativa, exemplificado pela Figura 27.

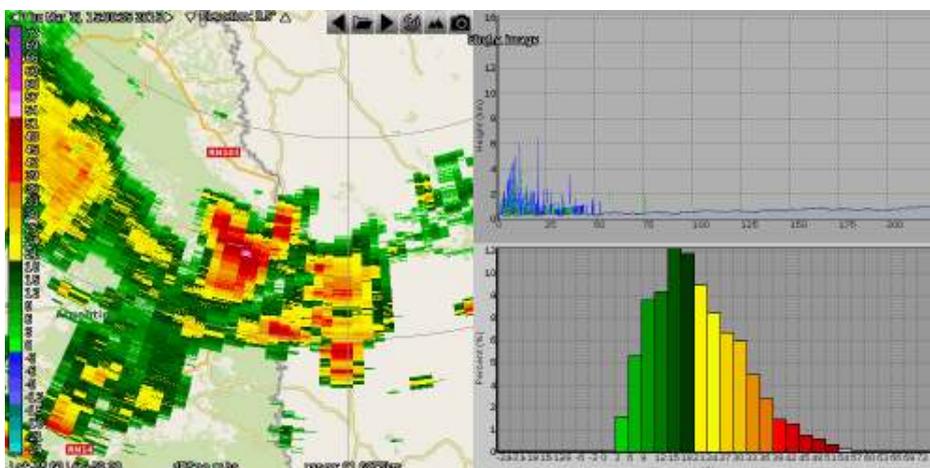


FIGURA 27: REPRESENTAÇÃO DO HISTOGRAMA APÓS A APLICAÇÃO DO ZOOM E PAN.

FONTE: O autor (2016)

Além disto, se utilizado o *Threshold*, o histograma removerá os valores fora do intervalo determinado pelo analista (Figura 28). Por ser apenas cópia da matriz original da grade do PPI, a remoção de valores não acarreta problemas posteriores e permite aplicar o pacote Numpy para aprimoramento do código, possibilitando que a opção de *Threshold* aplicada no histograma se torne interativa, como no PPI e no corte vertical.

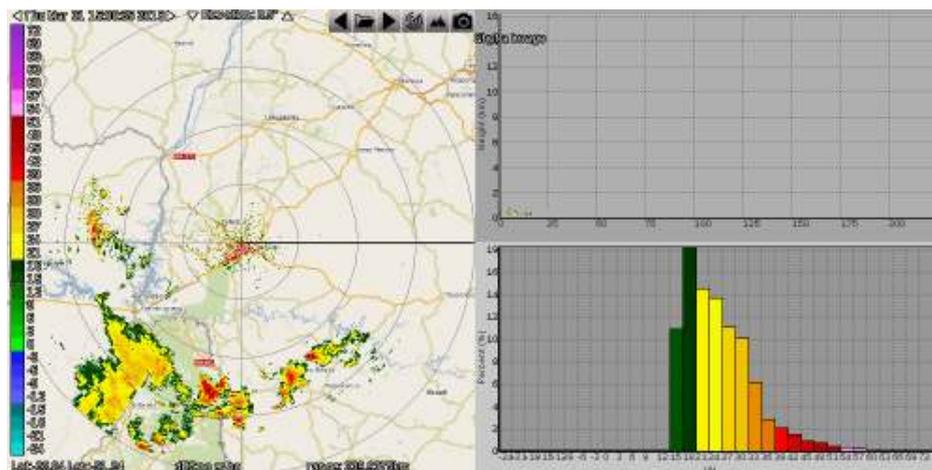


FIGURA 28: REPRESENTAÇÃO DO HISTOGRAMA APÓS A APLICAÇÃO DO THRESHOLD.

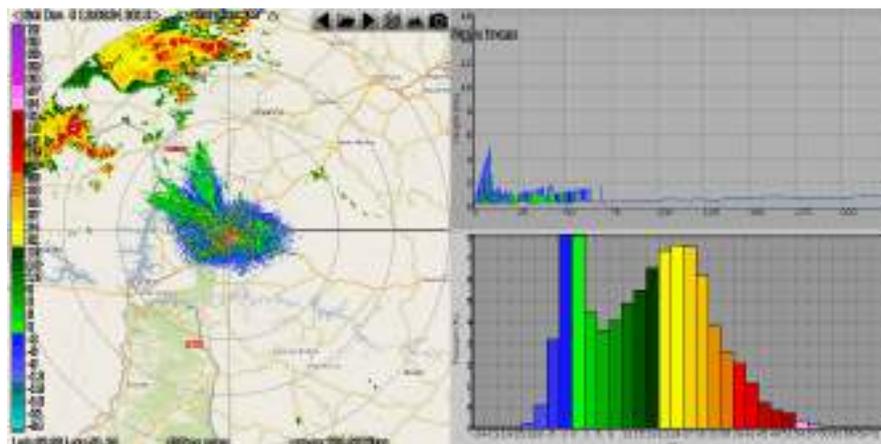
FONTE: O autor (2016)

3.4.11 GERAÇÃO DE FIGURAS

A utilização de figuras na meteorologia pode facilitar na explicação do fenômeno tanto para leigos quanto pessoas que possuem conhecimento amplo no assunto. Portanto, foi desenvolvido no RADEX a opção de geração de Figuras, afim de facilitar o analista para escrever relatórios ou artigos sobre o assunto estudado.

A geração de figuras utiliza propriedades do Pygame, onde cada superfície representa uma funcionalidade, possibilitando gerar imagens para cada superfície, significando que é possível escolher somente figuras que têm maior poder de relevância para a necessidade em vez de uma única imagem com a tela inteira do Pygame.

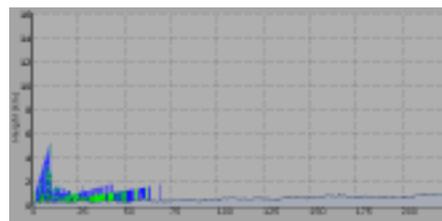
O tempo de processamento para a geração de figuras é menor que 300 ms, tornando prático gerar as imagens no Pygame do que realizar o *printscreen* e ter que modificar a figuras em editores de imagens. As figuras geradas são: toda a tela do RADEX, representada pela Figura 29(a); superfície 1 (relativa ao PPI), representada pela Figura 29(b); superfície 2 (relativa ao corte vertical ou perfil vertical), representada pela Figura 29(c); superfície 3 (relativa ao Ascope ou histograma ou gráfico da dispersão), representada pela Figura 29(d) e a tabela de cores, representada pela Figura 29(e).



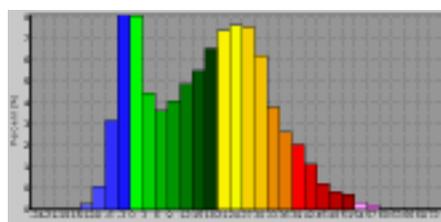
(a) RADEX.



(b) PPI.



(c) CORTE VERTICAL.



(d) HISTOGRAMA.

(e)
CORES.

FIGURA 29: GERAÇÃO DE FIGURAS POR MEIO DAS SUPERFÍCIES DO RADEX.

FONTE: O autor (2016)

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentado o visualizador interativo RADEX, introduzindo motivos para o seu desenvolvimento e como ele pode ser útil para o meteorologista.

Foram apresentadas novas ferramentas visando a usabilidade e a UX, visando ao menor esforço do usuário para entendimento do sistema e com isso tomar decisões e tirar conclusões rápidas.

Por meio dos conceitos meteorológicos e do RADEX, apresentados nos Capítulos 2 e 3, respectivamente, foi possível o desenvolvimento de controles de qualidade para dados de radar, descrito com mais detalhes no Capítulo 4.

4 CONTROLE DE QUALIDADE NA VISUALIZAÇÃO DE DADOS DE RADAR METEOROLÓGICO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Existem diversas condições que podem causar alterações nos dados coletados por radares meteorológicos, fazendo com que os dados não correspondam à realidade, limitando, portanto, a capacidade do meteorologista em identificar eventos severos e tomar decisões acertivas. Por essa razão, existe o interesse no desenvolvimento de algoritmos, chamados filtros, que possam realizar a correção dos dados e realizar o efetivo controle do qualidade.

Neste Capítulo são descritos algumas situações em que pode ocorrer alterações nos dados de radar, além disso, são relatados estudos realizados e o desenvolvimento de dois filtros para processar a correção dos dados, os quais são integrados ao visualizador descrito no Capítulo 3. Os algoritmos para o controles de qualidade desenvolvidos focam em dois aspectos chave: o desempenho e a eficácia. Deseja-se que o algoritmo realize o processamento em um tempo aceitável para sua utilização no visualizador interativo e que seja efetivo na correção dos dados.

Para avaliação e validação dos algoritmos implementados, foi realizada a comparação dos resultados obtidos com os dados de classificação de hidrometeoros, disponíveis como um dos produtos do radar polarimétrico, e que são processados no próprio *hardware* do radar. Esse produto possibilitou, por meio da comparação dos resultados obtidos, determinar a eficácia de cada algoritmo apresentado (Capítulo 5) .

4.2 COLETA DE DADOS

A qualidade dos dados adquiridos a partir de radares meteorológicos é comumente afetada por “ruídos” indesejados, ocasionados pela presença de insetos, pássaros,

partículas suspensas no ar, propagações anômalas de sinal e variação de topografia. Essas interferências resultam em ecos (sinais) que não correspondem à precipitação, comprometendo o trabalho do meteorologista na vigilância de eventos severos e na previsão a curto prazo sendo, portanto, necessário realizar controles de qualidade nos dados de radar. Esse controle pode ser realizado de várias maneiras diferentes e para várias ocasiões, segundo a necessidade.

Os diversos ruídos que afetam a qualidade dados podem ser denominados por: dados meteorológicos que não representam precipitação e dados não meteorológicos.

4.2.1 DADOS METEOROLÓGICOS QUE NÃO REPRESENTAM PRECIPITAÇÃO

Dentre os dados meteorológicos que não representam precipitação, é possível citar hidrometeoros que representam nuvens e índices de refração decorridos em dias de céu claro (correntes de ar).

A detecção desses elementos depende da sensibilidade do radar e do comprimento de onda, sendo as nuvens melhores detectadas por radares que utilizam comprimento de onda curtos, enquanto os índices de refração tornam-se mais visíveis com a utilização de radares com comprimento de onda longos (FABRY, 2015).

4.2.2 DADOS NÃO METEOROLÓGICOS

Os dados não meteorológicos são chamados de *clutters* (ruídos). Os *clutters* podem ser divididos entre:

- PA (propagações anômalas);
- Ecos de terreno (*ground clutter*) e ecos de mar (*sea clutter*);
- Agentes biológicos (insetos, aves);

Propagações anômalas são tipos de interferências que podem levar a uma significativa contaminação nos dados de radar. São causadas pela mudança na direção

de propagação da energia emitida pelo radar devido a variações nas condições atmosféricas (STEINER; SMITH, 2002). Com isso, o raio de propagação pode atingir a superfície terrestre e retornar sinais que se confundem com sinais de precipitação (Figura 30).

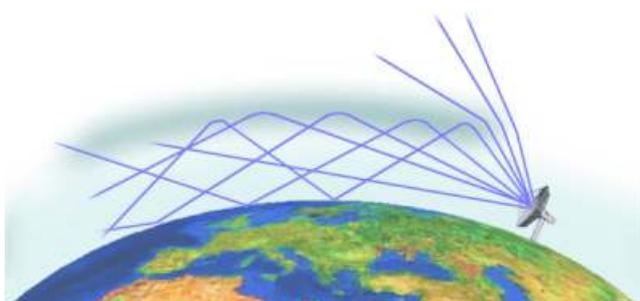


FIGURA 30: PROPAGAÇÕES ANÔMALAS.

FONTE: Wolff (2015)

Ecossistemas de terreno (Figura 31), ecos de mar, e agentes biológicos podem ser identificados pelo radar, tanto quando a topografia ou insetos e aves refletem ondas emitidas pelo radar, como também por causa das variações nas condições atmosféricas (PA), causando desvio nas ondas e entrando em contato com a topografia ou com agentes biológicos.



FIGURA 31: ECO DE TERRENO.

FONTE: Canada (2015)

4.2.3 CONTROLE DE QUALIDADE

Embora existam inúmeros estudos na literatura científica referentes a controle de qualidade de dados de radar, o foco destes trabalhos nem sempre está relacionada

com o tempo de processamento do algoritmo, mas sim com a eficiência do algoritmo. O fato de não relacionar o tempo de processamento, é por apresentar equipamentos robustos para o processamento de algoritmos, não havendo necessidade em otimizar o código a ponto de diminuir o tempo de processamento.

No entanto, por falta de equipamentos com alto grau de processamento, exige-se otimização de códigos e diminuições de condições e cálculos utilizados no processo para, enfim, integrar algoritmos para controle de qualidade em sistemas de visualização interativos, visando equilibrar a eficiência com desempenho computacional.

Entre vários fatores que atrapalham os meteorologistas na identificação de tempestades e outros eventos, foi notado que as principais causas são os hidrometeoros representados por dados meteorológicos que não representam precipitação e os *clutters*. Portanto, foi escolhido realizar neste trabalho a remoção dos hidrometeoros que não representam precipitação (tanto meteorológicos quanto não meteorológicos). Esses elementos são denotados neste trabalho por não-precipitação.

Existem várias técnicas para o controle de qualidade, dentre elas, algoritmos que utilizam redes neurais, como descrito por Lakshmanan et al. (2003). Trabalhos como de Buriol et al. (2008), Lakshmanan et al. (2007), buscam a identificação da precipitação e não-precipitação. Técnicas que identificam os hidrometeoros são comumente denotadas por Classificação de Hidrometeoros (CHM), conforme descritas por Chandrasekar et al. (2011), Ferreira et al. (2010), entre outros.

Muitas dessas técnicas exigem tempo de processamento, tornando inviável adicioná-las ao sistema interativo, exigindo a busca por outras técnicas que realizem o CQ nos dados de radar. Como dados fornecidos para o trabalho são do radar polarimétrico dual, foi decidido o desenvolvimento de dois filtros, onde ambos buscam a remoção da não-precipitação.

O primeiro filtro foi baseado em Steiner e Smith (2002), com alterações para reduzir o tempo de processamento (SELUZNIAK et al., 2015b), e torná-lo suficientemente aceitável para uma visualização interativa. O algoritmo para o CQ é baseado em uma

árvore de decisão que utiliza refletividade. O segundo filtro aproveita as variáveis polarimétricas para realização do CQ e foi adaptado dos trabalhos de Tang et al. (2014), Marks et al. (2011), Lakshmanan et al. (2009), Dixon e Seed (2014) e Seltmann (2001). A validação dos filtros foi realizada por meio da CHM do próprio radar.

4.3 FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO

O algoritmo foi projetado para ser aplicado em um único volume de dados, fazendo uso da estrutura tridimensional dos dados de refletividade (Z), aproveitando o formato já aplicado no RADEX. No algoritmo são utilizados três parâmetros: a extensão vertical de ecos de radar (ECHOtop), a variação absoluta da refletividade (SPINchange) e o gradiente vertical de refletividade (vertGRAD).

O algoritmo é executado no conjunto de dados dispostos em uma grade em coordenadas esféricas com três graus de liberdade (θ, r, ϕ), onde θ é o azimute (ângulo em relação ao norte), r é o range (distância do alvo até radar) e ϕ é a elevação da antena. Visando diminuir o tempo de processamento, o filtro foi desenvolvido com o auxílio da biblioteca Numpy, evitando condições e laços, alguns dos fatores que levam o Python a utilizar um maior tempo de processamento que outras linguagens.

O parâmetro ECHOtop é definido como maior altitude onde o valor de refletividade (dBZ) (DAMIAN, 2011), correspondente a uma intensidade mínima (REFLthresh = 5 dBZ), já que valores abaixo de REFLthresh não são significativos. Por meio desse parâmetro, são realizados testes para verificar se os valores de ECHOtop são iguais ou não aos valores da primeira elevação. Caso seja verdadeiro, estes elementos não representam precipitação, sendo portanto, removidos. Do contrário, são mantidos.

O parâmetro SPINchange indica o número de flutuações de refletividade, expressando todas as possíveis mudanças de *spin*. Variações maiores que 2 dBZ (aumento ou redução) nos valores de refletividade, a partir de um ponto da matriz para o ponto adjacente na direção radial, resultam no que é chamado de *spin* (HUBBERT; DIXON; ELLIS, 2009; PETER; SEED; STEINLE, 2013). Valores abaixo de 2 dBZ são conside-

rados insignificantes e, portanto, não têm efeito sobre o parâmetro *spin*.

O cálculo realizado por Steiner e Smith (2002) foi definido para uma área centrada no *pixel* de estudo, que apresenta dimensão de 11 *pixels* na direção do azimute e 21 *pixels* na direção radial. No algoritmo desenvolvido, adotando práticas para otimizar o tempo de processamento, o SPINchange foi calculado a partir de um ponto da matriz para o ponto adjacente na direção radial. O cálculo do SPINchange é descrito por:

$$SPINchange = abs(Z_i - Z_{i+1}), \quad (11)$$

onde Z_i representa um elemento da matriz Z com *bin* igual a i e raio e elevação fixos e Z_{i+1} sendo o próximo *bin*.

O parâmetro vertGRAD estima a diferença de refletividade entre os pontos da matriz nas duas primeiras elevações, normalizado pela diferença dos ângulos das elevações. A unidade do vertGRAD é dBZ/°. A equação que determina vertGRAD é definida por:

$$vertGRAD = \frac{Z_0 - Z_1}{\phi_1 - \phi_0}, \quad (12)$$

onde Z_0 e Z_1 representam a matriz Z para a primeira e segunda elevação respectivamente, e ϕ_1 e ϕ_0 representam os ângulos das elevações para segunda e primeira elevação respectivamente.

A Figura 32 representa a árvore de decisões do algoritmo desenvolvido para o primeiro filtro.



FIGURA 32: ÁRVORE DE DECISÃO PARA O FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO.

FONTE: O autor (2015)

A sequência é aplicada para cada elemento da matriz polar do volume sendo denotado como Z_{pixel} . Os índices da matriz que são removidos, têm seus valores atribuídos para -999. Em todos os testes é verificado se os valores de cada parâmetro não são considerados como valor de preenchimento (*Fill Value*). Caso Z_{pixel} seja considerado como valor de preenchimento, ele é removido. A equação para retirar o valor

de preenchimento é dada por:

$$Z_{pixel} = Fill_Value \implies Z[Z_{pixel}] = -999, \quad (13)$$

onde $Fill_Value$ representa os valor de preenchimento e Z_{pixel} é o índice (inteiro) da matriz de refletividade.

Primeiramente, é comparado o valor de Z_{pixel} com o valor de um liminar ($REFLthresh = 5$ dBZ). Caso o valor esteja abaixo, ele é removido, caso contrário, ele é mantido e passa para o próximo teste. O resultado dessa etapa é demonstrado pela Figura 33(b).

A equação que define a remoção de valores abaixo de $REFLthresh$ é descrita por:

$$Z_{pixel} < REFLthresh \implies Z[Z_{pixel}] = -999, \quad (14)$$

onde Z_{pixel} é o índice (inteiro) da matriz de Z .

A próxima verificação compara o valor do $ECHO_{top}$, no intuito de verificar se está ou não na primeira elevação. Caso ele esteja, o Z_{pixel} é removido, caso contrário, o Z_{pixel} é mantido, e assim, será realizado o próximo teste. O resultado dessa etapa, pode ser visualizado na Figura 33(c).

A verificação do $ECHO_{top}$ é dada pela equação 15:

$$ECHO_{top}[Z_{pixel}] = 1 \implies Z[Z_{pixel}] = -999, \quad (15)$$

onde Z_{pixel} é o índice (inteiro) da matrizes.

Posteriormente é realizado um teste verificando a variação na refletividade (correspondendo à mudança de *spin* (STEINER; SMITH, 2002)). O teste compara os valores de $SPINchange$ e $SPINthresh$ (é uma variável que define um filtro mais agressivo para intensidades superiores). $SPINthresh$ é definido pela equação 16:

$$SPINthresh = 8\% - \frac{(Z_{pixel} - 40)}{15}, \quad (16)$$

conforme Seluzniak et al. (2015b), $SPINthresh$ representa a porcentagem máxima possível dos $SPINchanges$ (STEINER et al., 1999).

Se $SPINthresh$ for maior que $SPINchange$, significa que o valor de $SPINchange$ não é alto suficiente para ser considerado como não-precipitação, portanto mantém o Z_{pixel} . Caso contrário, é realizado o último teste. Por não haver remoção de *pixels* nessa etapa da árvore de decisão, o resultado dessa etapa é o mesmo da segunda etapa, a Figura 33(c).

Para finalizar, é testado o valor de $vertGRAD$ para Z_{pixel} . Caso o valor de $vertGRAD$ seja inferior ao valor de $GRADthresh$, constante atribuída com o valor $10 \text{ dBZ}/^\circ$ de acordo com Steiner e Smith (2002), mantém-se o Z_{pixel} . Caso contrário, é utilizado o ponto da elevação acima em comparação com Z_{pixel} , definido por $Z_{pixelUp}$. O teste com $vertGRAD$ é definido pela equação 17:

$$vertGRAD[Z_{pixel}] > GRADthresh \implies Z[Z_{pixel}] = Z_{pixelUp}, \quad (17)$$

onde Z_{pixel} é o índice (inteiro) da matrizes.

O resultado do primeiro filtro é representado pela Figura 33(d).

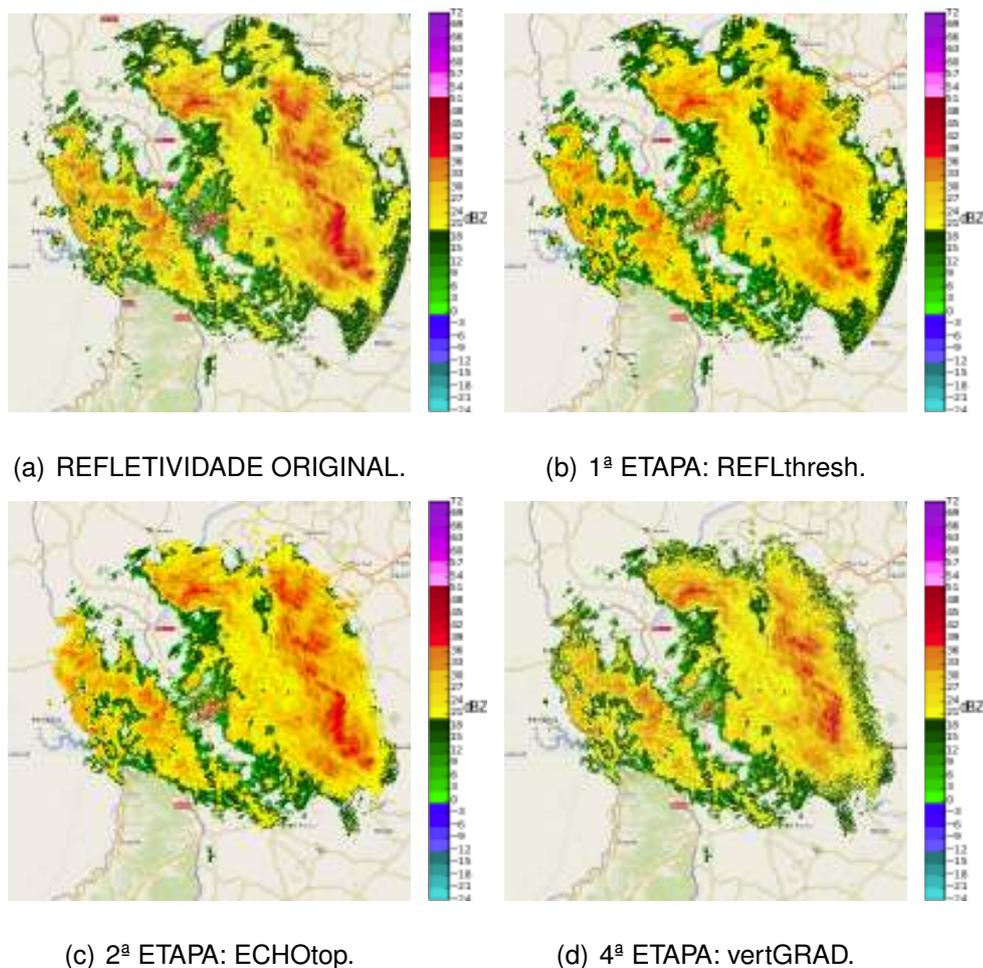


FIGURA 33: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL E AS IMAGENS GERADAS PARA CADA ETAPA DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO.

FONTE: O autor (2015)

4.4 FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL

O desenvolvimento deste filtro utiliza variáveis polarimétricas. O radar polarimétrico dual possui maior capacidade na identificação de ecos. Esta capacidade é bem adequada para a qualidade dos dados, visando à redução de dados não meteorológicos (CHANTHAVONG et al., 2010; LAKSHMANAN et al., 2009). Para seu desenvolvimento, foram estudadas técnicas desde redes neurais apresentadas por Lakshmanan et al. (2003), Silva Neto (2008), Buriol et al. (2008), entre outras, lógica fuzzy descritas por Chandrasekar et al. (2011), Hubbert, Dixon e Ellis (2009), Mahale, Zhang e Xue (2014), Park et al. (2009), até árvores de decisão conforme Marks et al. (2011). Porém

essas técnicas não buscam priorizar o tempo de processamento, por serem executadas em máquinas de alta performance, exigindo modificações delas para o uso num sistema interativo.

Utilizaram-se os estudos de Tang et al. (2014), Marks et al. (2011), Lakshmanan et al. (2009), Dixon e Seed (2014), Seltmann (2001) para o desenvolvimento de uma técnica que permitisse que o tempo de processamento fosse aceitável e com resultados satisfatórios. De maneira similar ao Filtro Steiner & Smith Modificado, o algoritmo foi desenvolvido com auxílio do pacote Numpy, no intuito de otimizar o tempo de processamento.

As variáveis polarimétricas utilizadas são Z_{DR} , ρ_{HV} , K_{DP} , e a refletividade (Z). Além dessas variáveis, é utilizado o produto chamado de *Clutter Correction* (CC) (SELT-MANN, 2001). O produto CC possui como característica a identificação da região considerada como *Clutter*, por meio de cálculos baseados com o retorno da intensidade do sinal.

O Filtro Polarimétrico Dual é representado pelo seguinte fluxograma, descrito na Figura 34.

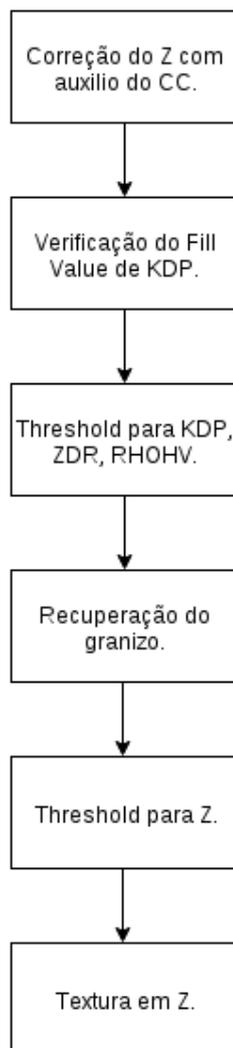


FIGURA 34: FLUXOGRAMA PARA O FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL.

FONTE: O autor (2016)

Para a execução desse filtro, é utilizada a matriz da refletividade para a realização dos testes expressados pelo fluxograma, onde são verificados todos os valores da matriz e modificados, caso necessário. Os índices da matriz que são removidos, têm seus valores atribuídos para -999.

O primeiro teste corresponde à utilização do produto *Clutter Correction*. Com a subtração entre as matrizes de Z e CC , é possível determinar a refletividade corrigida (SELTMANN, 2001). A equação para a refletividade corrigida (Z_{corr}), é descrita pela equação 18:

$$Z_{corr} = Z - CC. \quad (18)$$

Com a Z_{corr} , é realizada a próxima etapa por meio de *Thresholds*, a partir das matrizes das variáveis polarimétricas K_{DP} , Z_{DR} e ρ_{HV} , respectivamente. A Figura 35(b), representa a refletividade corrigida por meio do produto CC.

Preliminarmente, é utilizada a matriz de K_{DP} para identificar sinais fracos ou incertos que nela são considerados como valor de preenchimento. São comparadas as matrizes de K_{DP} e Z_{corr} , para remover os valores de preenchimento identificados em K_{DP} (MARKS et al., 2011), por meio da equação 19:

$$K_{DP}[i, j] = Fill_Value \implies Z_{corr}[i, j] = -999, \quad (19)$$

onde *Fill_Value* representa os valor de preenchimento e i e j são os índices (inteiros) das matrizes.

A Figura 35(c) representa o teste de verificação do valor de preenchimento de K_{DP} .

Após a remoção dos valores de preenchimento, é realizada a remoção de valores de Z_{corr} que estão fora do intervalo de -2°/km a 3°/km da matriz de K_{DP} . Os intervalos foram definidos com base no estudo realizado por Marks et al. (2011). As equações 20 e 21 que definem a remoção são definidas por:

$$K_{DP}[i, j] < -2. \implies Z_{corr}[i, j] = -999 \quad (20)$$

$$K_{DP}[i, j] > 3. \implies Z_{corr}[i, j] = -999, \quad (21)$$

onde i e j são os índices (inteiros) das matrizes.

Em seguida, é aplicada a remoção de valores da matriz de Z_{corr} correspondentes as valores removidos da matriz de Z_{DR} . São removidos todos os valores de Z_{corr} que apresentam valores da matriz de Z_{DR} em módulo maiores que 2.3dB (LAKSHMANAN et al., 2009). A equação 22 é definida por:

$$|Z_{DR}[i, j]| > 2.3 \implies Z_{corr}[i, j] = -999, \quad (23)$$

onde i e j são os índices (inteiros) das matrizes.

Para finalizar essa etapa, é realizada a remoção dos valores da Z_{corr} , equivalentes aos valores de ρ_{HV} abaixo de 0.95, sendo descrita pela equação 24:

$$\rho_{HV}[i, j] < 0.95 \implies Z_{corr}[i, j] = -999, \quad (24)$$

onde i e j são os índices (inteiros) das matrizes.

Porém, a eliminação destes valores pode ocasionar a remoção de possíveis áreas de granizo em certos casos (TANG et al., 2014). Realizada essa etapa, é possível analisar o resultado do filtro pela Figura 35(d).

A próxima etapa do fluxograma, está relacionada com a recuperação das possíveis áreas de granizo removidas em Z_{corr} , pelo fato de poder existir valores representativos de ρ_{HV} abaixo de 0.95.

São necessárias informações das matrizes de ρ_{HV} e de refletividade (Z), já que a matriz Z_{corr} sofreu várias alterações e são necessárias informações do dado bruto. A informação da matriz de ρ_{HV} , é localizar os valores na primeira elevação abaixo de 0.95.

Para Z , são necessárias realizações de dois testes. O primeiro teste verifica se o valores de ECHOtop (topo da nuvem) de pelos menos 18 dBZ estão acima de 8 km. O segundo teste corresponde em localizar os valores na primeira elevação maiores que 45 dBZ (possível granizo) (TANG et al., 2014).

Para definir ECHOtop, é necessário determinar a altitude para cada ponto a matriz de dados. O cálculo da altitude é dado por Zhang, Howard e Gourley (2005), conforme a equação 25:

$$h = \sqrt{r^2 + r_t^2 + 2 * r * r_t * \sin(\phi)} - r_t + r_a, \quad (25)$$

onde h é a altitude do *bin*, r é a distância do *bin* em relação ao radar, r_t é o raio da terra, ϕ é o ângulo de elevação da antena do radar e r_a é a altitude da antena do radar com relação ao solo.

Por meio do cálculo da altitude para cada *bin*, é possível determinar o ECHOtop por meio da equação 26:

$$h > 8 \wedge Z[i, j] \geq 18 \implies ECHOtop[i, j] = Z[i, j], \quad (26)$$

onde i e j são os índices (inteiros) das matrizes e \wedge é o conectivo lógico “e”.

Os testes são feitos para cada ponto da primeira elevação. Caso o valor da matriz de ρ_{HV} for abaixo 0.95, o valor referente ao ECHOtop pelo menos 18 dBZ e o valor de Z maior que 45 dBZ, tem-se que esse valor é referente ao granizo. Caso o ponto não esteja representado pela matriz Z_{corr} , ele deve ser adicionado. A equação 27 define esta etapa, sendo definida por:

$$\rho_{HV}[i, j] < 0.95 \wedge Z[i, j] > 45 \wedge ECHOtop[i, j] < -999 \implies Z_{corr}[i, j] = Z[i, j], \quad (27)$$

onde i e j são os índices (inteiros) das matrizes e \wedge é o conectivo lógico “e”.

A Figura 35(e) representa o filtro até a atual etapa.

Por fim, são removidos todos os valores abaixo de 5 dBZ para Z_{corr} . Esses valores são comumente afetados por ruídos e devem ser desconsiderados (MARKS et al., 2011). A equação 28 é descrita por:

$$Z_{corr} < 5 \implies Z_{corr}[i, j] = -999, \quad (28)$$

onde i e j são os índices (inteiros) das matrizes.

Essa etapa é retratada pela Figura 35(f).

Para finalizar o filtro, é aplicada textura sobre Z_{corr} . Esta textura tem como função eliminar os *pixels* que não possuem pontos próximos a ele, e portanto são representados como não-precipitação.

4.4.1 TEXTURA

A textura é definida como o desvio padrão da matriz da refletividade para uma certa distância (DIXON; SEED, 2014; HUBBERT; DIXON; ELLIS, 2009; PETER; SEED; STEINLE, 2013). Porém, o tempo de processamento para realizar o desvio padrão para cada ponto da matriz é alto, podendo demorar mais de 45 segundos conforme a dimensão da matriz, tornando inviável a sua aplicação no PPI para um sistema interativo.

Entretanto, com a ajuda da biblioteca científica Scipy, existe uma função que realiza o processo com resultados próximos e com um menor tempo de processamento. A função do Scipy realiza o cálculo com relação a mediana, denotada pela equação 29:

$$Z_{corr} = \text{scipy.ndimage.filters.median_filter}(Z_{corr}, 5), \quad (29)$$

onde Z_{corr} , representa a matriz de dados para a realização da textura e o valor 5 determina o tamanho da região em torno do *pixel*, para o cálculo da mediana.

Entretanto, o valor escolhido para determinar o tamanho da região pode não ser o ideal dependendo das condições. Para proporcionar mais autonomia ao analista, foi inserida a opção dele escolher esse valor. Com isso, é possível, conforme a preferência do usuário, determinar a textura sem perder informações relevantes.

Com uso de *hotkeys*, é possível alterar o tamanho da região em torno do *pixel* que será usado para realização da textura.

A textura é uma funcionalidade do RADEX utilizada com o Filtro Polarimétrico Dual.

O fato dela ser uma ferramenta no sistema interativo permite a sua utilização em outros momentos do radar e no corte vertical. Assim, o meteorologista ganha mais recursos para analisar os dados, como exemplificado na Figura 36.

O resultado do segundo filtro é representado pela Figura 35(g).

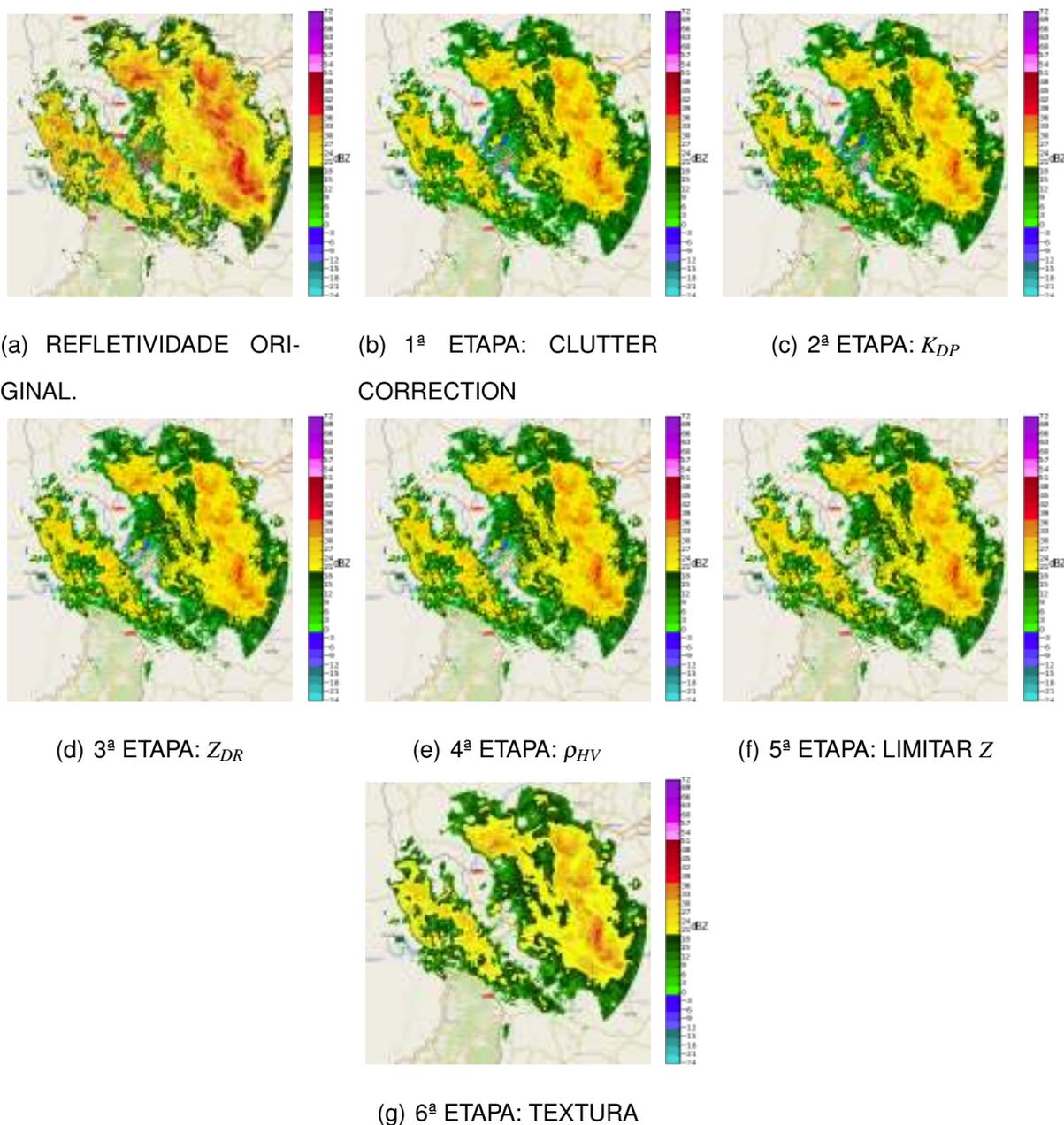
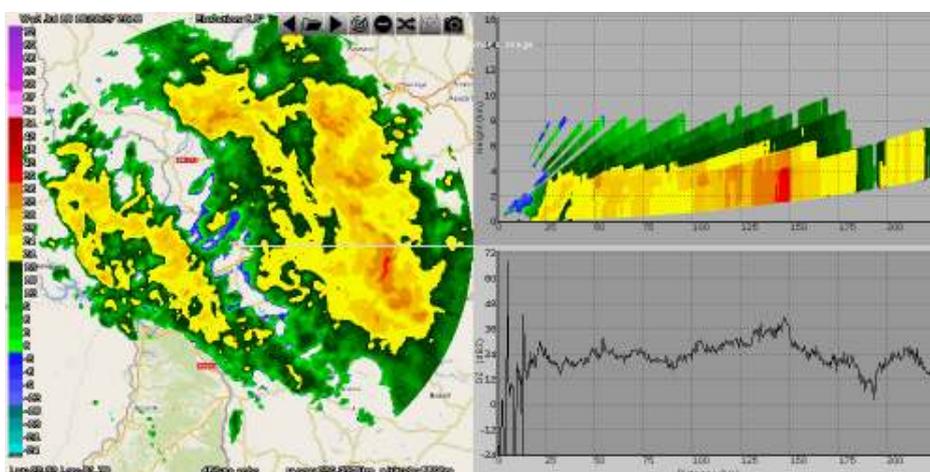


FIGURA 35: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL E AS IMAGENS GERADAS PARA CADA ETAPA DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL.

FONTE: O autor (2016)



(a) ORIGINAL



(b) COM TEXTURA

FIGURA 36: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a) E IMAGEM COM TEXTURA (b) PARA DIA 15/07/2015 ÀS 15H30MIN DO RADAR DE CASCAVEL.

FONTE: O autor (2016)

4.5 FILTRO MANUAL

O controle de qualidade, no entanto, não remove todos os dados de não-precipitação. Por esse motivo foi desenvolvido o Filtro Manual, que apresenta a liberdade para retirar possíveis áreas de não-precipitação, conforme necessidade do meteorologista. A seleção da região é por meio da área quadrada, descrita no Capítulo 3 na subseção 3.4.3 sobre o gráfico de dispersão e perfil vertical.

A área removida ainda permanece na matriz dos dados, sendo retirado somente os

valores de grade do PPI. Isso possibilita a recuperação os dados para outras análises, conforme desejo do meteorologista.

Como esse filtro funciona para uma área quadrada, torna-se dependente das funcionalidades do *Zoom* e *Pan*, pois nem sempre uma célula que não representa precipitação pode ser coletada por uma área quadrada, exigindo maior esforço por parte do usuário para ter melhor precisão na remoção.

Por trabalhar na grade e não na matriz dos dados, o filtro apresenta tempo de processamento mínimo (menos de 50 ms), pois evita-se o reprocessamento da grade, alterando somente os seus valores. Como a grade apresenta mesma dimensão que a superfície do Pygame, evita a mudança de coordenadas, otimizando o processamento.

A Figura 37 retrata o resultado do Filtro Manual.

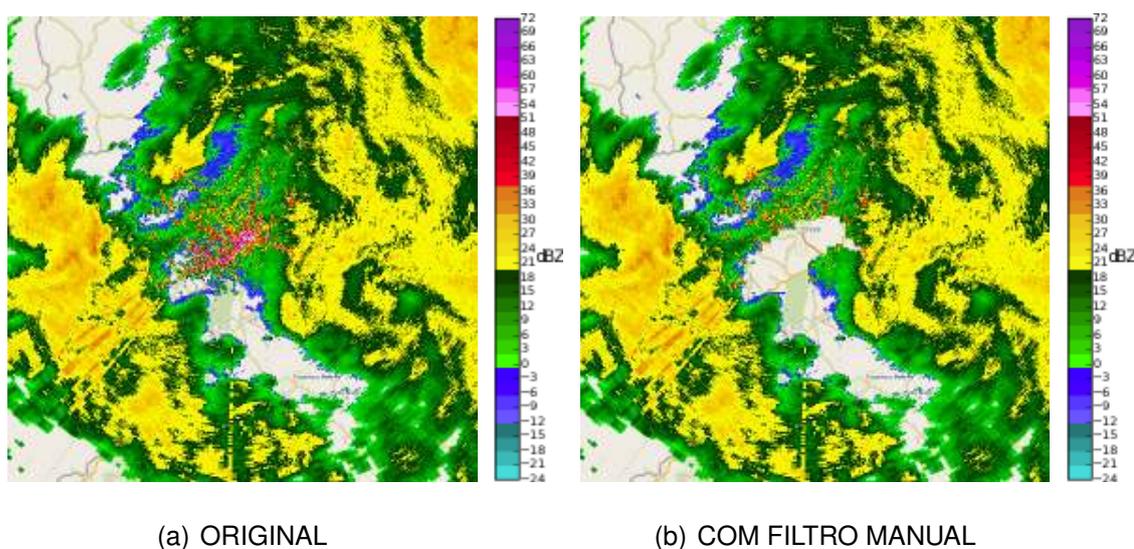


FIGURA 37: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a) E IMAGEM GERADA PELO FILTRO MANUAL (b) PARA DIA 15/07/2015 ÀS 15H30MIN DO RADAR DE CASCAVEL.

FONTE: O autor (2016)

4.6 CLASSIFICAÇÃO DE HIDROMETEOROS

No intuito de realizar comparações entre os filtros desenvolvidos para medir sua eficiência, foi utilizada a classificação de hidrometeoros (CHM).

A classificação de hidrometeoros trata de categorizar os hidrometeoros medidos pelo radar, podendo representar um elemento meteorológico ou não. Existem várias maneiras de fazer esta classificação, conforme a quantidade de informações disponíveis. Estas classificações geralmente são feitas através de lógica fuzzy (AL-SAKKA et al., 2013; CHANDRASEKAR et al., 2011; HUBBERT; DIXON; ELLIS, 2009; MAHALE; ZHANG; XUE, 2014; PARK et al., 2009).

A lógica fuzzy é uma classificação que diferentemente da lógica booleana, onde valores assumem apenas um de dois valores possíveis, 0 e 1, a lógica lida com infinitos valores entre 0 e 1. Com isto, é possível encontrar valores não inteiros, como 0.5 que representa a meia verdade. Esses valores são úteis para melhorar a identificação do hidrometeoro independente da sua forma, sua inclinação ou até mistura com outros, pensamento que não pode ser atribuído à lógica booleana (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

Com a necessidade de lidar com a complexidade dos problemas na meteorologia, em determinar o que cada hidrometeoro representa, a utilização da lógica fuzzy é considerada uma boa abordagem para CHM (AL-SAKKA et al., 2013).

Para realizar o controle de qualidade com a lógica fuzzy, o uso de variáveis polarimétricas é essencial, porém a adição de outras informações não coletadas pelo radar contribuem para uma melhor classificação. Estudos como de Park et al. (2009) utilizam a altura com relação ao nível da camada de derretimento (transição de neve para chuva), existindo mistura dos dois hidrometeoros nessa altitude. Trabalhos como de Schuur et al. (2012) fazem uso de temperatura para CHM.

O radar de Cascavel possui um algoritmo que realiza o cálculo para determinar a CHM utilizando lógica fuzzy por meio da refletividade e as variáveis polarimétricas. O resultado deste cálculo está presente no dado de radar (Figura 38). A classificação é composta pelos seguintes elementos: GC (*Ground Clutter*), SC (*Sea clutter*), BI (*Biological*), DS (*Dry snow*), WS (*Wet snow*), IC (*Ice crystals*), GR (*Graupel*), BD (*Big drops*), RA (*Rain*), HR (*Heavy rain*), HA (*Hail*) (PARK et al., 2009).

Os hidrometeoros categorizados como não-precipitação são representados por GC, SC e BI, os outros são considerados como precipitação.

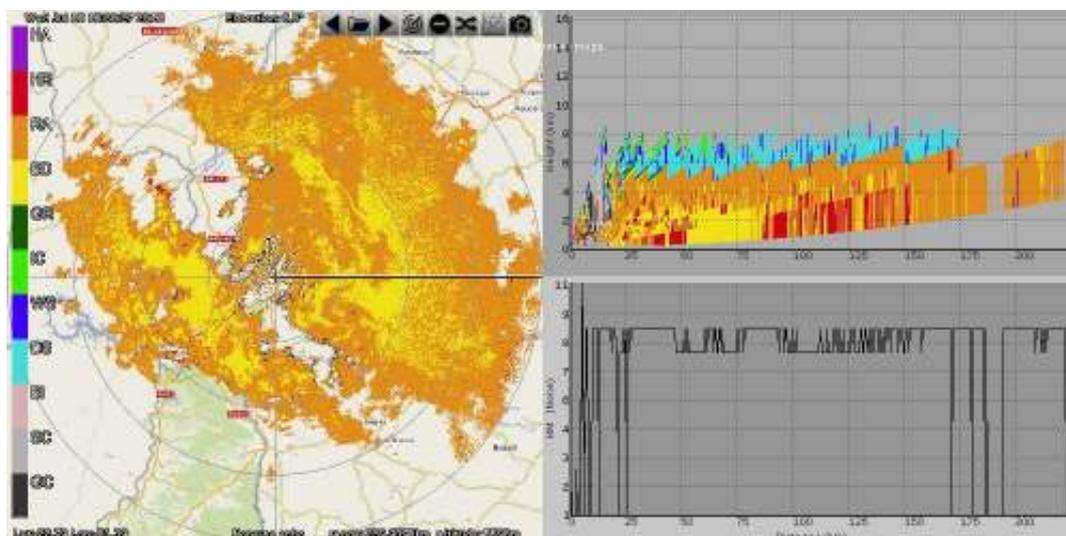


FIGURA 38: REPRESENTAÇÃO DO PRODUTO CHM NO RADEX PARA DIA 15/07/2015 ÀS 15H30MIN DO RADAR DE CASCAVEL.

FONTE: O autor (2015)

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, foram apresentados problemas que podem ou não afetar os dados de radar e, com isso, influenciar negativamente em tomadas de decisões e em identificação de eventos severos.

Com o sistema de visualização apresentado no Capítulo 3, foi possível o desenvolvimento de novas técnicas de controle de qualidade, baseadas em algoritmos consolidados na comunidade científica. Esses novos procedimentos apresentados neste Capítulo visam equilíbrio tanto em eficiência quanto no tempo de processamento, possibilitando que sejam implementadas no RADEX.

Por fim, foi apresentada a CHM, proporcionando identificar o que o hidrometeoro representa à meteorologia. Com todas essas informações, pode-se realizar análise de cada filtro para determinar tanto a sua eficiência quanto o tempo necessário para processamento. Esses resultados são apresentados no Capítulo 5.

5 RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os controles de qualidade apresentados no Capítulo 4 foram comparados com a CHM para verificar a eficiência de cada filtro desenvolvido. Para análise dos resultados foram utilizados os dados do radar de Cascavel. Os resultados de cada filtro foram comparados com a CHM do radar para a primeira elevação.

Os filtros foram aplicados no momento refletividade (Z), como apresentado na Figura 39. Apesar do radar de Cascavel disponibilizar entre os momentos coletados a refletividade corrigida (Figura 39)(a), em certos casos, ela remove áreas que correspondem à precipitação, podendo influenciar o resultado do filtro de maneira negativa.

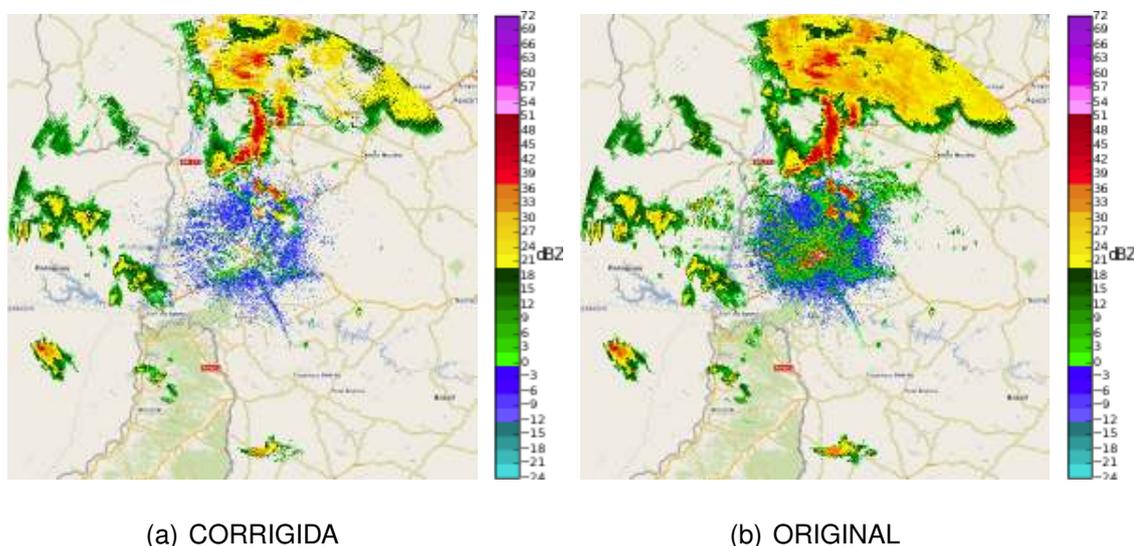


FIGURA 39: DIFERENÇAS ENTRE A REFLETIVIDADE CORRIGIDA (a) E A REFLETIVIDADE (b).

FONTE: O autor (2016)

Os pontos que são abordados para determinar a eficiência do filtro são: porcentagem de precipitação correta que foi removida pelo filtro, porcentagem de precipitação

adicionada pelo filtro, porcentagem de precipitação correta mantida pelo filtro, porcentagem de não-precipitação removida pelo filtro e tempo de processamento.

As figuras foram obtidas com a ajuda do sistema de visualização RADEX e somente sendo representado o PPI para elevação de 0.5°, a primeira elevação do radar de Cascavel e a mais representativa para identificação da precipitação.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As porcentagens foram determinadas a partir da razão dos *pixels* de precipitação e não-precipitação. Foi utilizado o método da Sensibilidade e Especificidade, a fim de determinar eventos de remoção e adição de precipitação e de identificação de precipitação e não-precipitação. A Tabela 2 demonstra o uso do método da Sensibilidade e Especificidade.

TABELA 2: MÉTODO DA SENSIBILIDADE E ESPECIFICIDADE.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	Verdadeiro Positivo	Falso Positivo
Não-precipitação	Falso Negativo	Verdadeiro Negativo

A porcentagem removida de precipitação (falso negativo), é a razão entre os *pixels* em comum do filtro e da CHM que representam não-precipitação e os *pixels* da CHM que representam precipitação. O cálculo da porcentagem removida de precipitação, é descrita pela equação 30:

$$\%Removida = \frac{P(f)_{\text{não-precipitação}}}{P(chm)_{\text{precipitação}}}, \quad (30)$$

onde os pontos são determinados a partir da função “P” que determina a quantidade de *pixels* da matriz, os elementos “f” e “chm” representam as matrizes dos filtros e da CHM, respectivamente, e o índice da função “P” indica se o *pixel* da matriz é equivalente a precipitação ou não-precipitação.

A porcentagem de precipitação adicionada (falso positivo), é a razão entre os *pixels*

em comum do filtro e da CHM que representam precipitação e os *pixels* da CHM que representam não-precipitação. O cálculo da porcentagem adicionada de precipitação, é descrita pela equação 31:

$$\%Adicionada = \frac{P(f)_{\text{precipitação}}}{P(chm)_{\text{não-precipitação}}}, \quad (31)$$

onde os pontos são determinados a partir da função “P” que determina a quantidade de *pixels* da matriz, os elementos “f” e “chm” representam as matrizes dos filtros e da CHM, respectivamente, e o índice da função “P” indica se o *pixel* da matriz é equivalente a precipitação ou não-precipitação.

A porcentagem correta de precipitação (verdadeiro positivo), é a razão entre os *pixels* em comum entre o filtro e a CHM que representam precipitação e os *pixels* da CHM que representam precipitação. O cálculo da porcentagem de precipitação correta mantida no filtro, é definida pela equação 32:

$$\%Precipitação = \frac{P(f == chm)_{\text{precipitação}}}{P(chm)_{\text{precipitação}}}, \quad (32)$$

onde os pontos são determinados a partir da função “P” que determina a quantidade de *pixels* da matriz, os elementos “f” e “chm” representam as matrizes dos filtros e da CHM, respectivamente, e o índice da função “P” indica se o *pixel* da matriz é equivalente a precipitação ou não-precipitação.

A porcentagem de remoção da não-precipitação (verdadeiro negativo), é a razão entre os *pixels* em comum entre o filtro e a CHM que representam não-precipitação e os *pixels* da CHM que representam não-precipitação. O cálculo da porcentagem de remoção da não-precipitação é definido pela equação 33:

$$\%Não-precipitação = \frac{P(f == chm)_{\text{não-precipitação}}}{P(chm)_{\text{não-precipitação}}}, \quad (33)$$

onde os pontos são determinados a partir da função “P” que determina a quantidade de *pixels* da matriz, os elementos “f” e “chm” representam as matrizes dos filtros e da

CHM, respectivamente, e o índice da função “P” indica se o *pixel* da matriz é equivalente a precipitação ou não-precipitação.

Nas próximas sessões, foram realizadas análises para os controles de qualidade desenvolvidos no Capítulo 4. Para as análises, teve uma busca de determinar quais metas estipular para o trabalho, porém não foi encontrado nenhum trabalho que trabalhasse com tais elementos utilizados para validação. Para isso, foi utilizado a ajuda do meteorologista para chegar nas seguintes metas:

- %Removida \leq 10%, independente das condições do tempo.
- %Adicionada \leq 10%, independente das condições do tempo.
- %Precipitação \geq 80%, independente das condições do tempo.
- %Não-precipitação \geq 60%, independente das condições do tempo.
- Tempo de processamento \leq 5 segundos, independente das condições do tempo.

Todos os cálculos foram realizados com a utilização do seguinte computador do tipo desktop: Processador: Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz x 8, Memória: 16 GB, Sistema Operacional: Debian GNU/Linux 8 (jessie) 64-bit, Placa de vídeo: NVIDIA Corporation G86 [Quadro NVS 290].

Os resultados foram expressos em tabelas, conforme a Tabela 3.

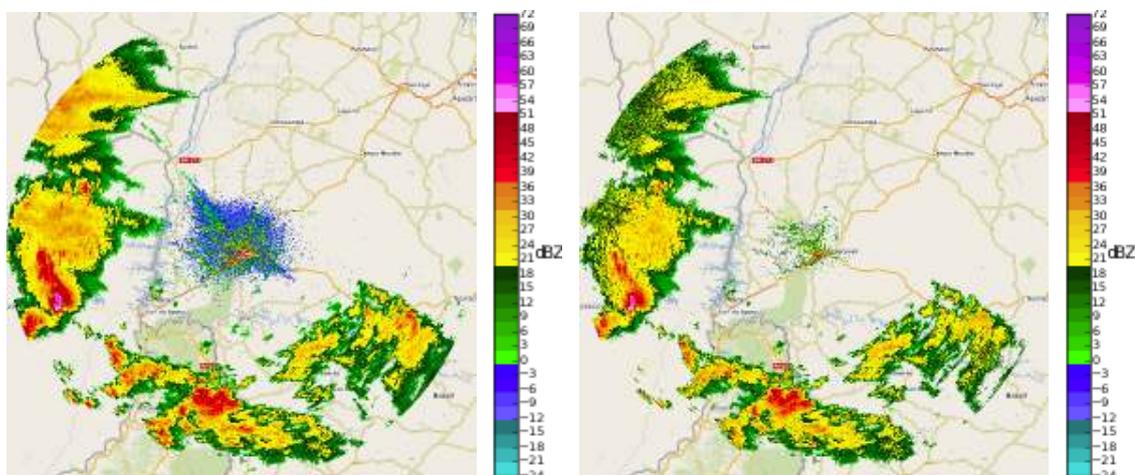
TABELA 3: FORMATO PADRÃO DAS TABELAS USADAS PARA ANÁLISE DE RESULTADOS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	%Precipitação	%Adicionada
Não-precipitação	%Removida	%Não-precipitação

5.2.1 ANÁLISES DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO

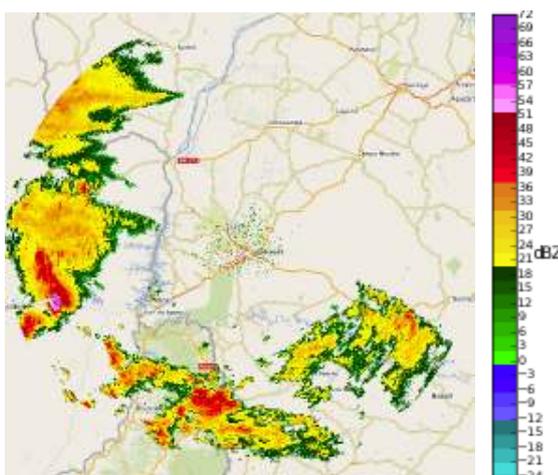
A análise do Filtro Steiner & Smith Modificado foi feita em três datas distintas. A primeira foi realizada para o dia 08/11/2015 às 12h30min UTC. A segunda foi realizada

para o dia 19/12/2015 às 10h00min UTC. A terceira foi realizada para o dia 09/03/2016 às 20h00min UTC.



(a) ORIGINAL

(b) FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO



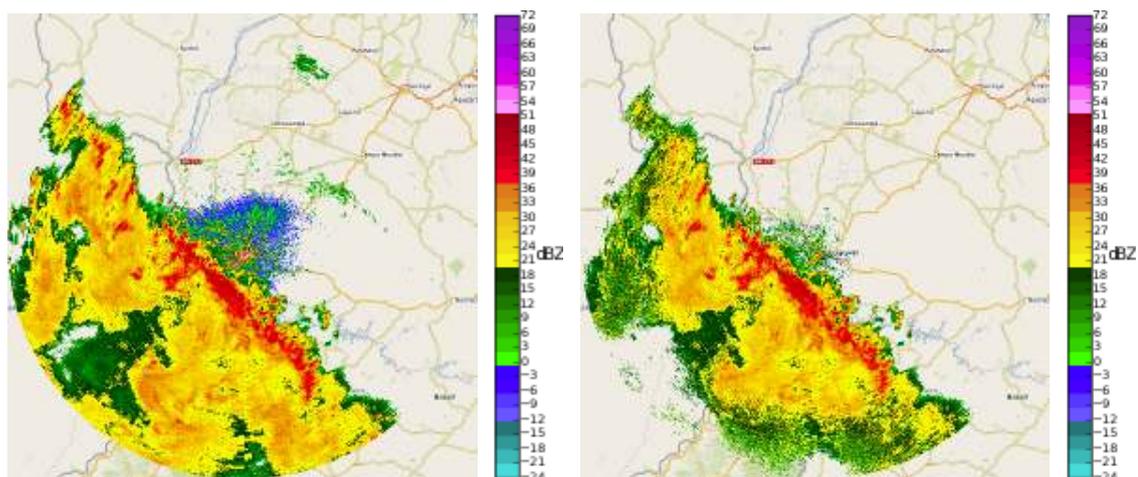
(c) CHM

FIGURA 40: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a), IMAGEM GERADA PELO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO (b) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (c), DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC.

FONTE: O autor (2016)

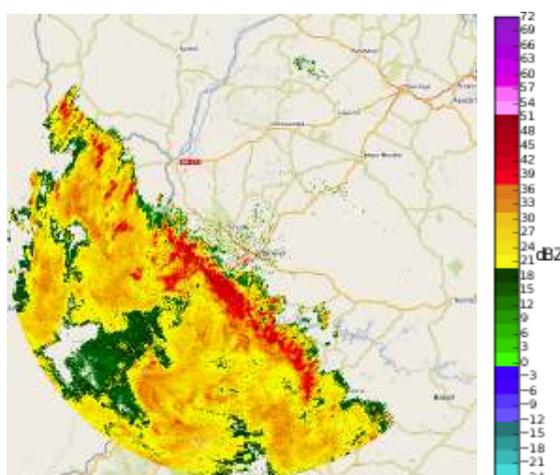
TABELA 4: REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO, DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 819 MS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	97.41%	4.96%
Não-precipitação	2.58%	61.06%



(a) ORIGINAL

(b) FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO



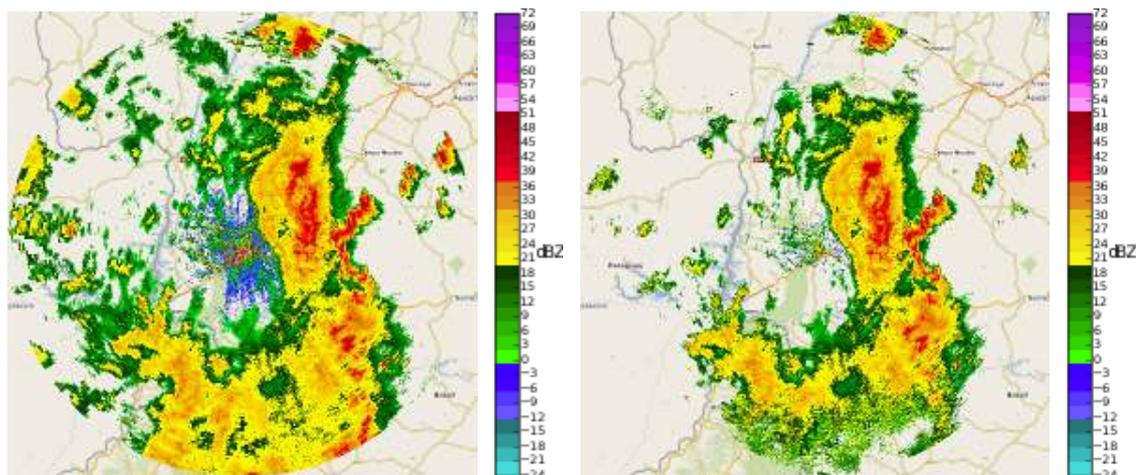
(c) CHM

FIGURA 41: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a), IMAGEM GERADA PELO FILTRO STEINER (b) & SMITH MODIFICADO E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (c), DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC.

FONTE: O autor (2016)

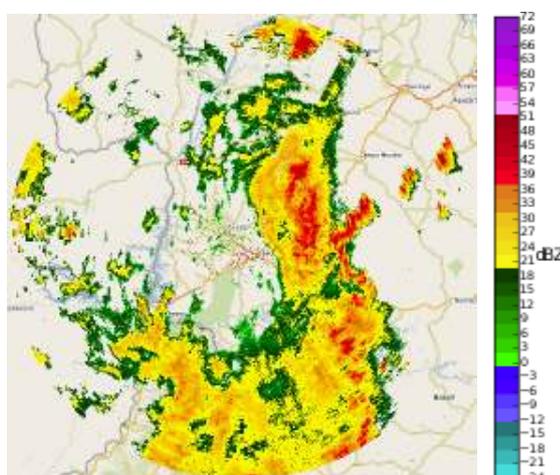
TABELA 5: REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO, DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 664 MS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	92.07%	2.96%
Não-precipitação	7.92%	63.36%



(a) ORIGINAL

(b) FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO



(c) CHM

FIGURA 42: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a), IMAGEM GERADA PELO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO (b) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (c), DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC.

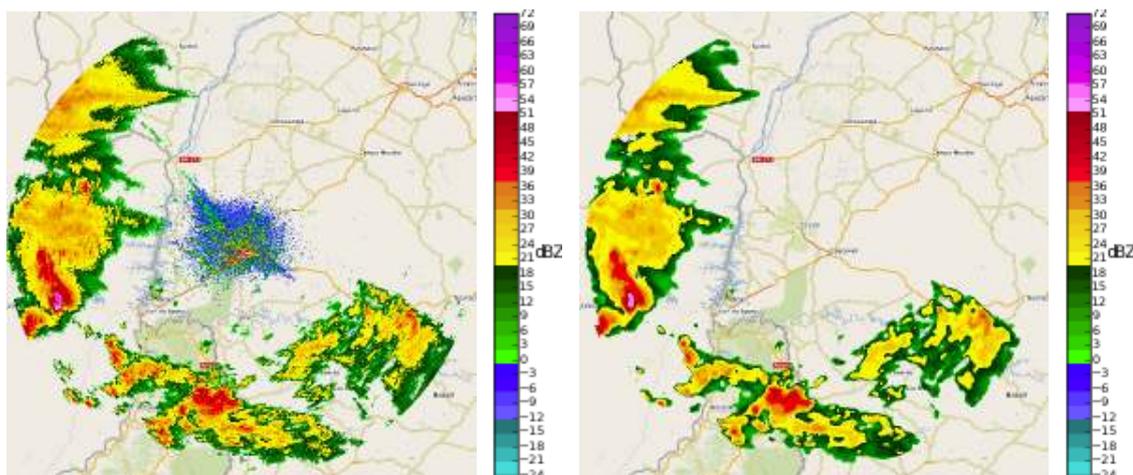
FONTE: O autor (2016)

TABELA 6: REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO, DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 791 MS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	86.71%	5.77%
Não-precipitação	13.28%	55.72%

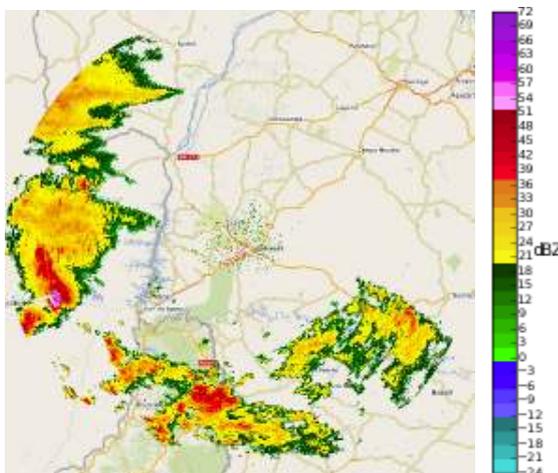
5.2.2 ANÁLISES DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL

A análise do Filtro Polarimétrico Dual foi feita em três datas distintas. A primeira foi realizada para o dia 08/11/2015 às 12h30min UTC. A segunda foi realizada para o dia 19/12/2015 às 10h00min UTC. A terceira foi realizada para o dia 09/03/2016 às 20h00min UTC.



(a) ORIGINAL

(b) FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL



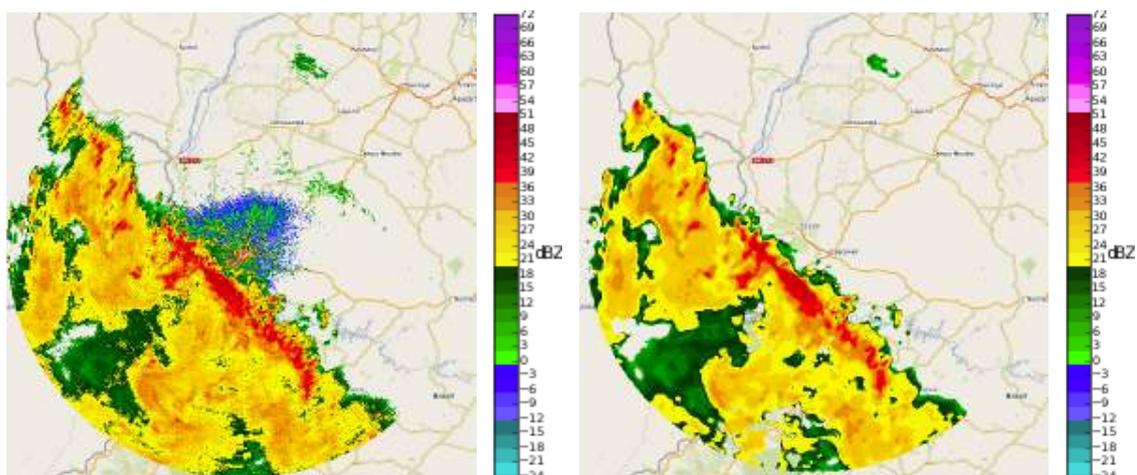
(c) CHM

FIGURA 43: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a), IMAGEM GERADA PELO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL (b) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (c), DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC.

FONTE: O autor (2016)

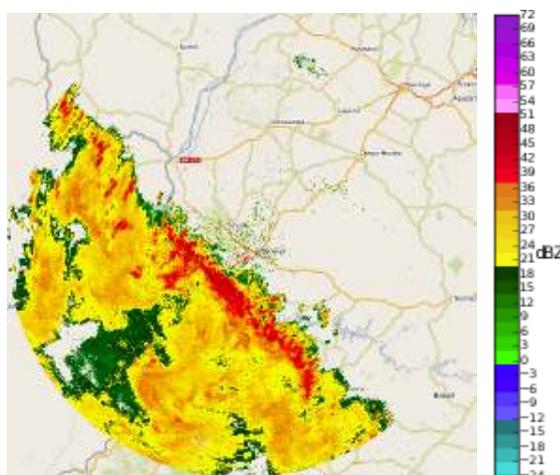
TABELA 7: REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL, DO DIA 08/11/2015 ÀS 12H30MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 4475 MS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	96.51%	4.31%
Não-precipitação	3.48%	84.74%



(a) ORIGINAL

(b) FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL



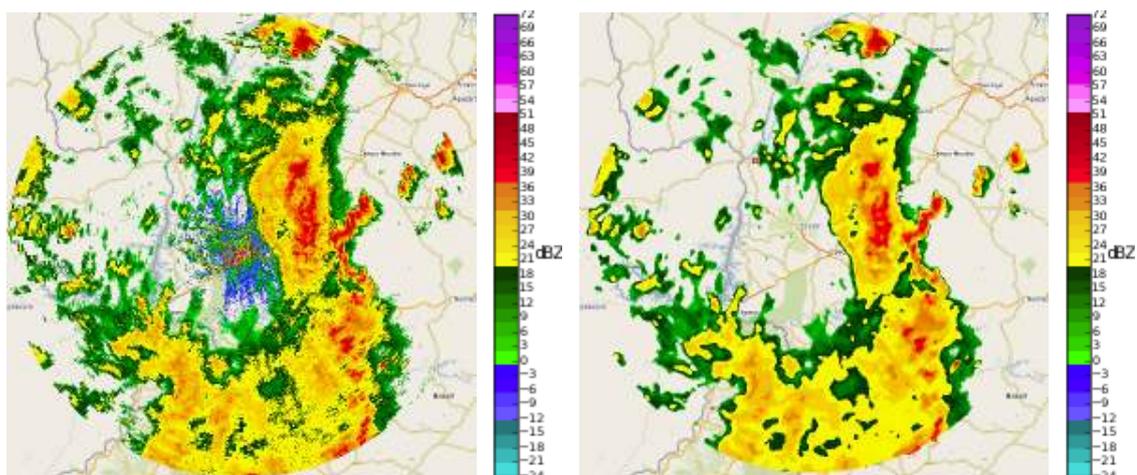
(c) CHM

FIGURA 44: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a), IMAGEM GERADA PELO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL (b) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (c), DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC.

FONTE: O autor (2016)

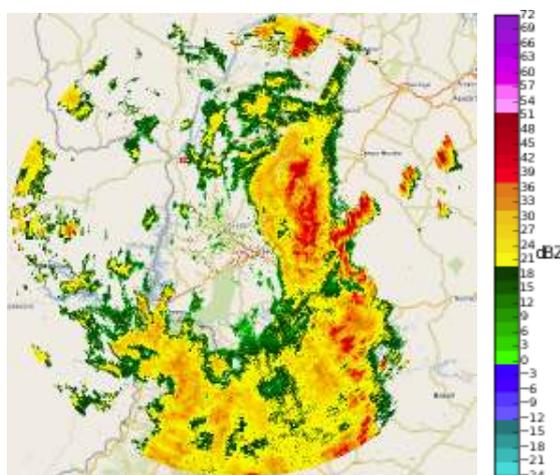
TABELA 8: REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL, DO DIA 19/12/2015 ÀS 10H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 3915 MS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	94.12%	2.98%
Não-precipitação	5.87%	86.06%



(a) ORIGINAL

(b) FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL



(c) CHM

FIGURA 45: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGEM ORIGINAL (a), IMAGEM GERADA PELO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL (b) E IMAGEM CORRIGIDA PELO PRODUTO CHM (c), DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC.

FONTE: O autor (2016)

TABELA 9: REPRESENTAÇÃO DAS PORCENTAGENS DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL, DO DIA 09/03/2016 ÀS 20H00MIN UTC. O TEMPO DE PROCESSAMENTO FOI DE 4956 MS.

Filtro / CHM	Precipitação	Não-precipitação
Precipitação	95.87%	9.23%
Não-precipitação	4.12%	73.18%

5.2.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para realizar a comparação dos resultados, foram selecionadas de maneira randômica, trinta datas diferentes entre os períodos de Janeiro e Fevereiro de 2016, contendo análises pontuais expressadas em gráficos *boxplot*, onde os filtros 1 e 2 são representados pelo Filtro Steiner & Smith Modificado e Filtro Polarimétrico Dual, respectivamente.

O gráfico *boxplot* (Figura 46) é uma análise gráfica que utiliza quatro estatísticas: mediana, primeiro e terceiro quartil da variável quantitativa e amplitude interquartil. Este conjunto de medidas oferece a ideia da posição, dispersão, assimetria, caudas e dados discrepantes.

A posição central é dada pela mediana (“ Md ”). Conforme a sua posição é possível determinar se a distribuição é assimétrica ou não. As posições relativas do primeiro e terceiro quartis correspondem a 50% dos valores. O primeiro e terceiro quartil são referentes as medianas das metades inferiores e superiores dos dados. Por meio delas, é possível determinar o valor de amplitude interquartil, que corresponde a diferenças dos quartis, descrito pela equação 34:

$$AIQ = Q_s - Q_i, \quad (34)$$

onde “ AIQ ” representa a amplitude interquartil e “ Q_s ” e “ Q_i ” são o terceiro e primeiro quartil, respectivamente.

Com “ AIQ ”, é possível calcular os dados discrepantes. O valor será conside-

rado atípico se estiver abaixo de “ Q_s ” ou acima de “ Q_i ” por uma distância maior que $1,5xAIQ$. Tal valor é utilizado para representar as caudas do gráfico, conforme diminuir o valor do “ Q_i ” e somar de “ Q_s ”, é possível representar a cauda inferior e superior, respectivamente.

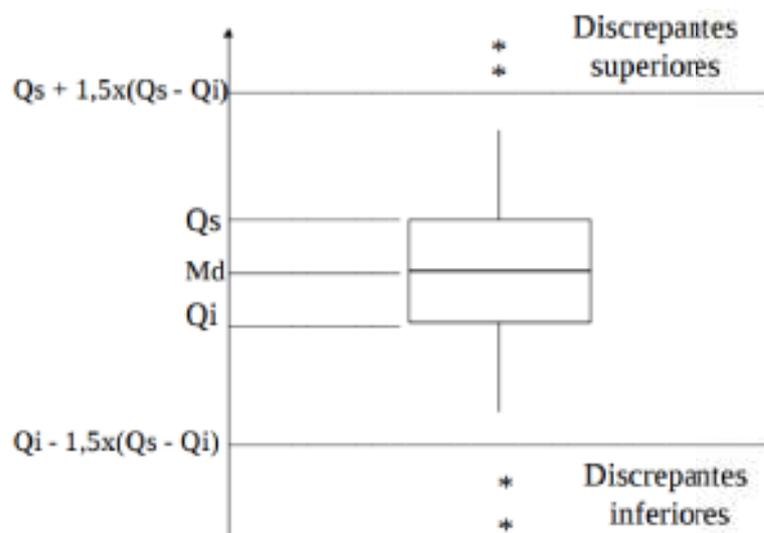


FIGURA 46: REPRESENTAÇÃO DO GRÁFICO BOXPLOT.

FONTE: O autor (2016)

Foram feitos gráficos *boxplot* para a %Removida, %Adicionada, %Precipitação, %Não-precipitação e o tempo de processamento, por meio deles, será possível determinar a porcentagem dos trinta dias aleatórios que cumpriram a meta, o comportamento desses dados e qual filtro apresenta melhor resultado. Para os gráficos *boxplot*, filtro 1 será representado pelo Filtro Steiner & Smith Modificado e o filtro 2 será definido para o Filtro Polarimétrico Dual.

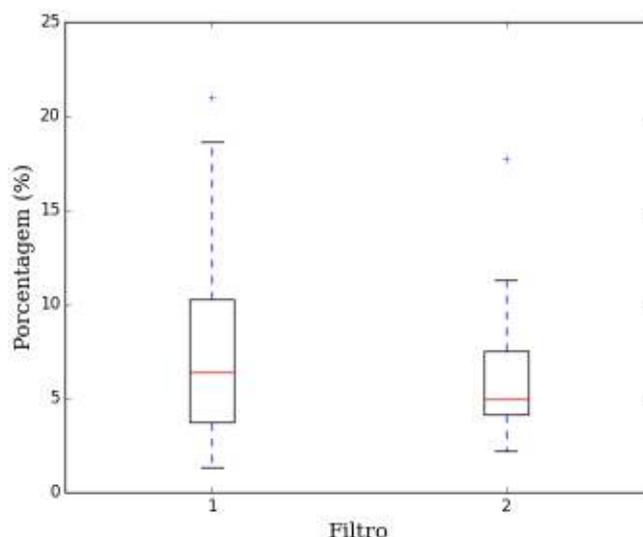


FIGURA 47: VALORES DA %REMOVIDA PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.

FONTE: O autor (2016)

Dada a Figura 47, é possível notar que para o Filtro Steiner & Smith Modificado, 77% dos dados cumpriram a meta de 10% da %Removida. Para Filtro Polarimétrico Dual, 93% dos dados cumpriram a meta de 10% da %Removida. Ambos os filtros apresentaram um valor discrepante superior, ou seja, apresentaram dados que estiveram acima de $Q_s + (1,5 \times AIQ)$.

Por apresentar maior medida de dispersão (amplitude interquartil) o Filtro Steiner & Smith Modificado do que o Filtro Polarimétrico Dual ($AIQ_{filtro1} \approx 6.5$ e $AIQ_{filtro2} \approx 3.3$), o filtro 2 apresenta menor variação independente das condições do tempo, apresentando melhor consistência.

Como em ambos os casos os valores das medianas dos filtros ($Md_{filtro1} \approx 6.2$ e $Md_{filtro2} \approx 4.9$) são menores que as suas médias ($M_{filtro1} \approx 7.8$ e $M_{filtro2} \approx 5.9$), ambos são positivamente assimétricos. Isso implica maior concentração de valores abaixo da mediana e isso é bom, pois busca-se valores baixos por tratar-se da porcentagem de remoção de precipitação e a maior parte dos valores está abaixo da mediana, valores que estão dentro da meta.

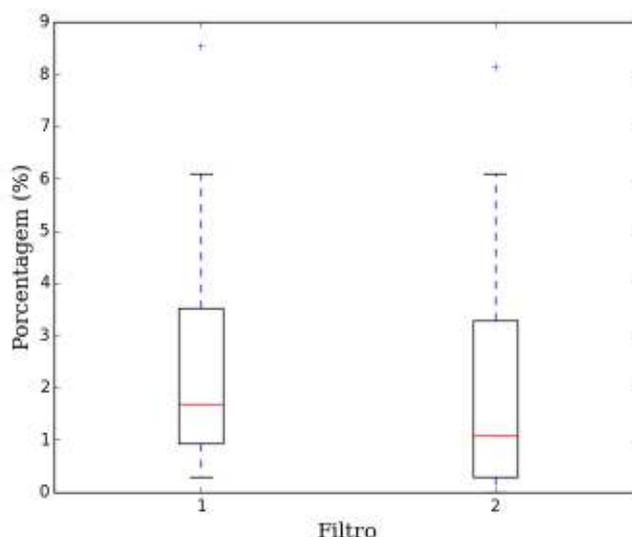


FIGURA 48: VALORES DA %ADICIONADA PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.

FONTE: O autor (2016)

Dado a Figura 48, é possível notar que em ambos os filtros cumpriram 100% dos dados dentro da meta de 10% da %Adicionada. Ambos os filtros apresentaram um valor discrepante superior, ou seja, apresentaram dados que estiveram acima de $Q_s + (1,5 \times AIQ)$.

Por apresentar menor medida de dispersão (amplitude interquartil) o Filtro Steiner & Smith Modificado do que o Filtro Polarimétrico Dual ($AIQ_{filtro1} \approx 2.5$ e $AIQ_{filtro2} \approx 3.0$), o filtro 1 apresenta menor variação independente das condições do tempo, apresentando melhor consistência.

Como em ambos os casos os valores das medianas dos filtros ($Md_{filtro1} \approx 1.6$ e $Md_{filtro2} \approx 1.0$) são menores que as suas médias ($M_{filtro1} \approx 2.3$ e $M_{filtro2} \approx 1.9$), ambos são positivamente assimétricos. Isso implica maior concentração de valores abaixo da mediana e isso é bom, pois busca-se valores baixos por tratar-se da porcentagem de adição de precipitação e a maior parte dos valores está abaixo da mediana, valores que estão dentro da meta.

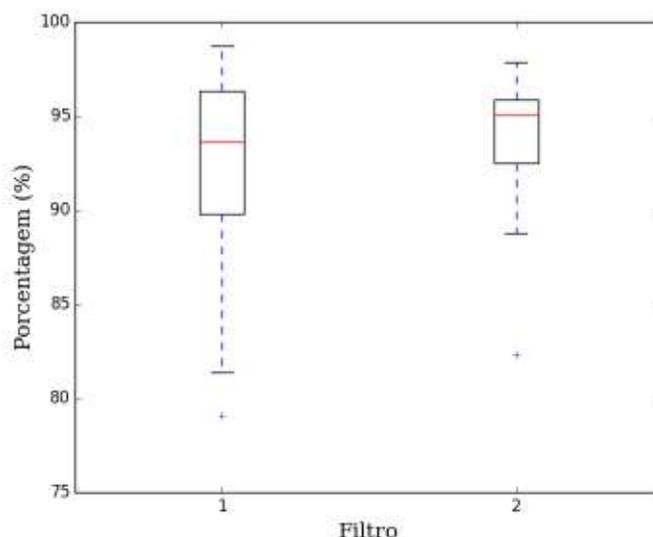


FIGURA 49: VALORES DA %PRECIPITAÇÃO PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.

FONTE: O autor (2016)

Pela Figura 49, é possível notar que para o Filtro Steiner & Smith Modificado, 97% dos dados cumpriram a meta de %80 da %Precipitação. Para Filtro Polarimétrico Dual, 100% dos dados cumpriram a meta de %80 da %Precipitação. Ambos os filtros apresentaram um valor discrepante inferior, ou seja, apresentaram dados que estiveram abaixo de $Qi - (1,5xAIQ)$.

Por apresentar maior medida de dispersão (amplitude interquartil) o Filtro Steiner & Smith Modificado do que o Filtro Polarimétrico Dual ($AIQ_{filtro1} \approx 6.5$ e $AIQ_{filtro2} \approx 3.2$), o filtro 2 apresenta menor variação independente das condições do tempo, apresentando melhor consistência.

Como em ambos os casos os valores das medianas dos filtros ($Md_{filtro1} \approx 93.6$ e $Md_{filtro2} \approx 95.0$) são maiores que as suas médias ($M_{filtro1} \approx 92.1$ e $M_{filtro2} \approx 94.0$), ambos são negativamente assimétricos. Isso implica maior concentração de valores acima da mediana e isso é bom, pois busca-se valores altos por tratar-se da porcentagem de acerto de precipitação e a maior parte dos valores está acima da mediana, valores que estão dentro da meta.

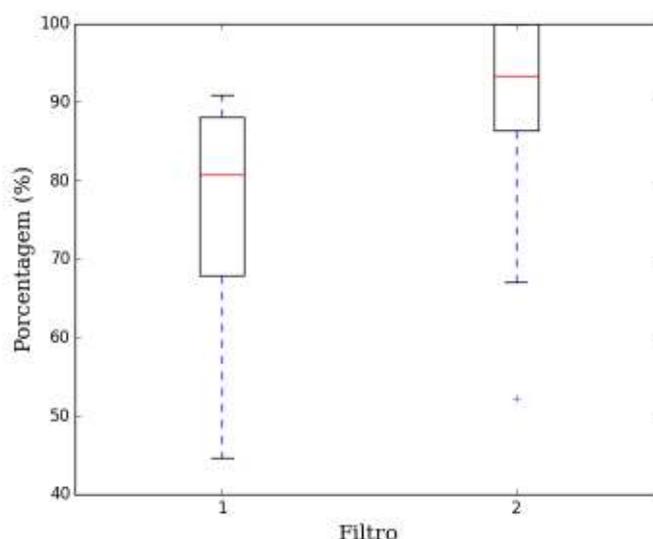


FIGURA 50: VALORES DA %NÃO-PRECIPITAÇÃO PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.

FONTE: O autor (2016)

Pela Figura 50, é possível notar que para o Filtro Steiner & Smith Modificado, 83% dos dados cumpriram a meta de %60 da %Não-precipitação. Para Filtro Polarimétrico Dual, 97% dos dados cumpriram a meta de %60 da %Não-precipitação. Somente o segundo filtro apresentou valor discrepante inferior, ou seja, apresentou dados que estiveram abaixo de $Qi - (1,5xAIQ)$.

Por apresentar maior medida de dispersão (amplitude interquartil) o Filtro Steiner & Smith Modificado do que o Filtro Polarimétrico Dual ($AIQ_{filtro1} \approx 19.9$ e $AIQ_{filtro2} \approx 14.0$), o filtro 2 apresenta menor variação independente das condições do tempo.

Como em ambos os casos os valores das medianas dos filtros ($Md_{filtro1} \approx 80.7$ e $Md_{filtro2} \approx 93.3$) são maiores que as suas médias ($M_{filtro1} \approx 76.4$ e $M_{filtro2} \approx 90.7$), ambos são negativamente assimétricos. Isso implica maior concentração de valores acima da mediana e isso é bom, pois busca-se valores altos por tratar-se da porcentagem de acerto de remoção de não-precipitação e a maior parte dos valores está acima da mediana, valores que estão dentro da meta.

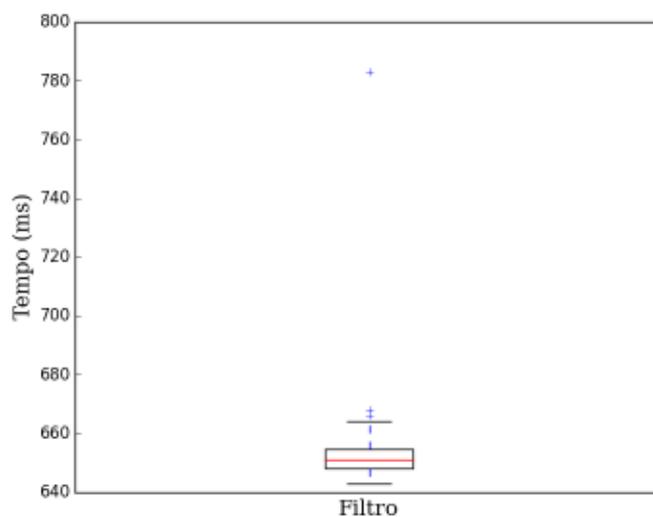


FIGURA 51: VALORES DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DO FILTRO STEINER & SMITH MODIFICADO PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.

FONTE: O autor (2016)

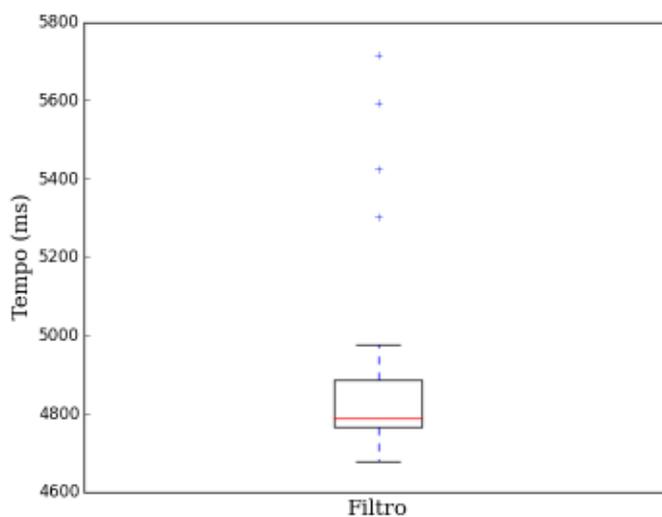


FIGURA 52: VALORES DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DO FILTRO POLARIMÉTRICO DUAL PARA 30 DIAS ALEATÓRIOS NO PERÍODO DE JANEIRO A FEVEREIRO DE 2016.

FONTE: O autor (2016)

Dado as Figuras 51 e 52, é possível notar que para o Filtro Steiner & Smith Modificado, 100% dos dados cumpriram a meta de 5 segundos para o processamento do algoritmo. Para Filtro Polarimétrico Dual, 87% dos dados cumpriram a meta de 5 segun-

dos para o processamento do algoritmo. Ambos os filtros apresentaram valores discrepantes superiores, ou seja, apresentaram dados que estiveram acima de $Q_S + (1,5 \times AIQ)$. Porém o filtro 2 apresentou 13% dos dados como sendo atípicos.

Por apresentar menor medida de dispersão (amplitude interquartil) o Filtro Steiner & Smith Modificado do que o Filtro Polarimétrico Dual ($AIQ_{filtro1} \approx 2.5$ e $AIQ_{filtro2} \approx 3.0$), o filtro 1 apresenta menor variação independente das condições do tempo. As informações necessárias para a execução do algoritmo, também contribuíram para essa variação maior no tempo de processamento.

Como em ambos os casos os valores das medianas dos filtros ($Md_{filtro1} = 651.0$ e $Md_{filtro2} = 4789.0$) são menores que as suas médias ($M_{filtro1} \approx 656.5$ e $M_{filtro2} \approx 4893.9$), ambos são positivamente assimétricos. Isso implica maior concentração de valores abaixo da mediana e isso é bom, pois busca-se valores baixos por tratar-se de tempo de processamento e a maior parte dos valores está abaixo da mediana, valores que estão dentro da meta.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse Capítulo foram apresentados os resultados para os filtros desenvolvidos no Capítulo 4. A fim de verificar se os controles de qualidade são satisfatórios ou não, por meio de metas impostas, os dados processados pelos filtros propostos foram comparados com o produto Classificação de Hidrometeoros (CHM).

Foram selecionados trinta e três dias para analisar os controles de qualidade desenvolvidos, sendo expressadas em figuras e tabelas os resultados para melhor representação. Dos trinta e três dados, três deles foram escolhidos apresentando tempestades. Os dados restantes foram escolhidos de forma aleatória no período de Janeiro e Fevereiro de 2016, visando comparar dados para condições do tempo arbitrárias.

Por fim, foram analisados os dados conforme as metas descritas nesse Capítulo, utilizando tabelas e gráficos *boxplot*.

6 CONCLUSÕES

A comunidade científica na área de meteorologia com radar discute comumente dois problemas: a urgência de um sistema interativo gratuito para os meteorologistas e o controle dos dados de radar. A ideia deste trabalho, foi trabalhar esses dois problemas no sentido de resolvê-los com os recursos disponibilizados.

Sobre uma proposta de um sistema interativo gratuito, foi desenvolvido o RADEX utilizando a linguagem de programação Python. Muitas das ferramentas desenvolvidas oferecem funcionalidades personalizadas, não disponíveis em outros programas, comerciais ou não. As facilidades e conveniências providas pelas bibliotecas e módulos disponíveis em Python permitiram a criação de programas de forma rápida e com bom desempenho.

Para resolver o problema de controle de qualidade, foram apresentados dois algoritmos para a correção dos dados visando poder utilizar uma das duas técnicas, independente do radar utilizado. Foram selecionadas trinta datas diferentes para uma análise geral dos filtros desenvolvidos no período de janeiro e fevereiro de 2016, mais três datas para uma análise mais aprofundada dos filtros. Todos os dados foram obtidos do radar de Cascavel (polarização dupla).

Foram realizadas cinco análises para verificar a eficiência dos filtros, sendo descritos por %Removida, %Adicionada, %Precipitação, %Não-precipitação e o Tempo de processamento. Por meio das metas, tem-se que, para o filtro Filtro Steiner & Smith Modificado, 76% dos dados cumpriram a meta para %Removida, 100% dos dados cumpriram a meta para %Adicionada, 97% dos dados cumpriram a meta para %Precipitação e 82% dos dados cumpriram a meta para %Não-precipitação.

No caso do filtro Filtro Polarimétrico Dual, foi obtido que, 94% dos dados cumpri-

ram a meta para %Removida, 100% dos dados cumpriram a meta para %Adicionada, 100% dos dados cumpriram a meta para %Precipitação e 97% dos dados cumpriram a meta para %Não-precipitação.

Dentre os dois controles de qualidades apresentados, o Filtro Polarimétrico Dual apresentou melhores resultados em quase todos os requisitos, sendo inferior somente em tempo de processamento. Portanto deve-se utilizar Filtro Polarimétrico Dual sempre que possível, deixando o Filtro Steiner & Smith Modificado para radares de polarização simples.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Aperfeiçoar as técnicas desenvolvidas, tanto mesclando-as, como também utilizando outras técnicas, como lógica fuzzy.
- Concluir a implementação da funcionalidade que permite a visualização 3D para o RADEX e o desenvolvimento de outras ferramentas para auxiliar o meteorologista.
- Tornar o RADEX disponível para a comunidade científica, possibilitando a contribuição de usuários para aperfeiçoamento do sistema de visualização.
- Aplicar as técnicas desenvolvidas para dados de outros radares de polarização dupla, e para radares de polarização simples (somente o Filtro Steiner & Smith Modificado), existentes no Brasil.
- Realizar testes do sistema interativo junto aos meteorologistas, para detectar possíveis dificuldades e ou falhas na interatividade como também adicionar possíveis funcionalidades de acordo com necessidades do dia a dia.
- Utilizar outras maneiras para comparação de resultados, como a relação ZR.

REFERÊNCIAS

- AL-SAKKA, H.; BOUMAHMOUD, A.-A.; FRADON, B.; FRASIER, S. J.; TABARY, P. A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the french x-, c-, and s-band polarimetric radars. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, p. 2328–2344, Oct 2013.
- ANDRIEU, H.; CREUTIN, J. D. Identification of vertical profiles of radar reflectivity for hydrological applications using an inverse method. Part I: Formulation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, p. 225–239, 1995.
- BENETI, C.; BURIOL, T.; SELUZNIAK, R.; BONATO, J.; OLIVEIRA, C.; CALVETTI, L. Improving interactive visualization of polarimetric weather radars - from open sources to games. In: **37th Conference on Radar Meteorology**. [S.l.: s.n.], 2015.
- BENETI, C.; BURIOL, T. M.; OLIVEIRA, C.; GAMA, A. Experiencing new ways to visually explore polarimetric radar data using numpy and pygame. In: **94th AMS Annual Meeting**. [S.l.: s.n.], 2014.
- BONATO, J. V. R. **Clusterização de Dados Meteorológicos para Comparação de Técnicas de Nowcasting**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos para Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2014.
- BORGES, L. E. **Python para desenvolvedores**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2010.
- BRINGI, V. N.; CHANDRASEKAR, V. **Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2001.
- BURIOL, T. M. **PROCESSAMENTO E VISUALIZAÇÃO DE CAMPOS EM AMBIENTES VIRTUAIS E SISTEMAS CAD 3D APLICADOS A PROJETOS DE ILUMINAÇÃO EM SUBESTAÇÕES**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos para Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2006.
- BURIOL, T. M.; BENETI, C. Experimentando processar e visualizar dados de radares meteorológicos usando numpy e pygame. In: **CMAC-Sul**. [S.l.: s.n.], 2014.
- BURIOL, T. M.; BENETI, C. Visualização científica interativa de dados de radar meteorológico. In: **XXXV CNMAC**. [S.l.: s.n.], 2014.
- BURIOL, T. M.; NETO, M. A. S.; SATO, F.; BENETI, C.; SCHEER, S.; STEINER, M. T. A. Uso de redes neurais artificiais e processamento de imagens para controle da qualidade dos dados do radar meteorológico do simepar. In: **XL SBPO**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2256–2267.
- BURIOL, T. M.; SELUZNIAK, R. H. L.; BENETI, C.; SCHEER, S. Radex - um sistema para visualização interativa e análise de dados de radares meteorológicos. In: **XXXVI CILAMCE**. [S.l.: s.n.], 2015.

- CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. Integração do radar meteorológico doppler do simepar e uma rede de pluviômetros para a estimativa de precipitação. In: **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Belo Horizonte: [s.n.], 2003. p. 1137–1144.
- CANADA, E. **Ground Clutter**. 2015. Acesso em: 16 de Novembro de 2015. Disponível em: <<https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=2B931828-1>>.
- CHANDRASEKAR, V.; KERÄNEN, R.; LIM, S.; MOISSEEV, D. Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. **Atmospheric Research**, Aug 2011.
- CHANTHAVONG, V.; HOLMES, J.; KERÄNEN, R.; PARIS, D.; SELZLER, J.; SIGGIA, A.; STORDELL, T. Mitigation of sea clutter and other non-stationary echoes based on general purpose polarimetric echo identification. In: **ERAD 2010 - THE SIXTH EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY**. [S.l.: s.n.], 2010.
- COELHO, F. C. **Computação Científica com Python**. 1. ed. Petrópolis, RJ: Flávio Codeço Coelho, 2007.
- CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. 2015. Acesso em: 3 de Outubro de 2015. Disponível em: <<http://cptec.inpe.br/>>.
- DAMIAN, E. A. **Dois metodologias aplicadas à classificação de precipitação convectiva e estratiforme com radar meteorológico: SVM e K-means**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos para Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2011.
- DIXON, M.; SEED, A. Developments in echo tracking - enhancing titan. **8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology**, p. 1–14, 2014.
- DOVIK, R. J.; ZRNIC, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. [S.l.]: Dover Publications, 2006.
- ERNVIK, A. **3D Visualization of Weather Radar Data**. Dissertação (Mestrado) — Linköping University, 2002.
- FABRY, F. **Radar Meteorology Principles and Practice**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.
- HEISTERMANN, M.; COLLIS, S.; DIXON, M. J.; GIANGRANDE, S.; HELMUS, J. J.; KELLEY, B.; KOISTINEN, J.; MICHELSON, D. B.; PEURA, M.; PFAFF, T.; WOLFF, D. B. The emergence of open-source software for the weather radar community. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 1, p. 117–128, 2015.
- HELMUS, J.; COLLIS, S.; JOHNSON, K.; NORTH, K.; GIANGRANDE, S.; JENSEN, M. The python-arm radar toolkit (py-art), an open source package for weather radar. In: **36th Conference on Radar Meteorology, Breckenridge, CO, USA**. [S.l.: s.n.], 2013.
- HEYMSFIELD, G. M.; GHOSH, K. K.; CHEN, L. C. An interactive system for compositing digital radar and satellite data. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 22, p. 705–713, 1983.

HUBBERT, J. C.; DIXON, M.; ELLIS, S. M. Weather radar ground clutter. part ii: Real-time identification and filtering. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 26, p. 1181–1197, Jul 2009.

IDRIS, I. **NumPy 1.5 Beginner's Guide**. [S.l.]: Packt Publishing Ltd., 2011.

JOHNSON, C. Top scientific visualization research problems. **IEEE Comput. Graph. Appl.**, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, v. 24, n. 4, p. 13–17, jul. 2004.

JONES, R. Rapid game development in python. **OpenSource Developers' Conference**, p. 84–90, 2005.

JORNAL DO OESTE. **Jornal do Oeste**. 2015. Acesso em: 31 de Julho de 2015. Disponível em: <<http://www.jornaldooeste.com.br/regiao/2014/04/novo-radar-meteorologico-comeca-a-operar-em-cascavel/890672/>>.

KETOLA, P.; ROTO, V. On user experience measurement needs – case nokia. **International Journal on Technology and Human Interaction (IJTHI)**, v. 05, p. 78–89, 2009.

KNIGHT, C. A.; VIVEKANANDAN, J.; LASHER-TRAPP, S. G. First radar echoes and the early zdr history of florida cumulus. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, p. 1454–1472, 5 2002.

LAKSHMANAN, V.; FRITZ, A.; SMITH, T.; HONDL, K.; STUMPF, G. J. An automated technique to quality control radar reflectivity data. **J. Applied Meteorology**, v. 46, n. 3, p. 288–305, Mar 2007.

LAKSHMANAN, V.; HONDL, K.; STUMPF, G.; SMITH, T. Quality control of weather radar data using texture features and a neural network. In: **5th Int'l Conf. on Adv. in Patt. Recogn.** [S.l.: s.n.], 2003.

LAKSHMANAN, V.; KARSTENS, C.; KRAUSE, J.; TANG, L. Quality control of weather radar data using polarimetric variables. **Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology**, v. 31, p. 1234–1249, Jun 2009.

LAKSHMANAN, V.; KARSTENS JOHN KRAUSE, K. E. C.; RYZHKOV, A.; BERKSETH, S. Which polarimetric variables are important for weather/no-weather discrimination? **Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology**, v. 32, p. 1209–1223, Jun 2015.

LIN, J. W. Why python is the next wave in earth sciences computing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 93, n. 12, p. 1823–1824, 2012.

LOPES DA ROCHA FILHO, K.; CONDE, F.; ANDRIOLI, C. P. Correção em tempo real da precipitação estimada por um radar meteorológico com uma rede de superfície. In: **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. [S.l.: s.n.], 2013.

MAHALE, V. N.; ZHANG, G.; XUE, M. Fuzzy logic classification of s-band polarimetric radar echoes to identify three-body scattering and improve data quality. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, p. 2017–2033, Aug 2014.

MARKS, D. A.; WOLFF, D. B.; CAREY, L. D.; TOKAY, A. Quality control and calibration of the dual-polarization radar at kwajalein, rmi. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 28, p. 181–196, Aug 2011.

MCGUGAN, W. **Beginning Game Development with Python and Pygame**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2007.

MCKINNEY, W. **Python for Data Analysis**. 1. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, 2013.

METED. **Weather radar fundamentals**. 2014. Acesso em: 27 de Fevereiro de 2014. Disponível em: <http://www.meted.ucar.edu/radar/basic_wxradar>.

OLIVEIRA, C. de. **Identificação e Correção da Banda Brilhante em Dados de Radar Meteorológico**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos para Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2014.

OLIVEIRA JR., A. A.; SCHEER, S.; SATO, F. 3d visualization tool for meteorological radar data using webgl. In: **10th World Congress on Computational Mechanics**. [S.l.: s.n.], 2014.

PADOVANI, S.; SCHLEMMER, A.; SCARIOT, C. A. Usability & user experience, usability versus user experience, usability in user experience? a theoretical and methodological discussion on commonalities and differences. In: **12º Ergodesign-Usihc**. [S.l.: s.n.], 2012.

PARK, H.; RYZHKOV, A. V.; ZRNIĆ, D. S.; KIM, K.-E. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric wsr-88d: Description and application to an mcs. **Weather and Forecasting**, v. 24, p. 730–748, Jun 2009.

PETER, J. R.; SEED, A.; STEINLE, P. J. Application of a bayesian classifier of anomalous propagation to single-polarization radar reflectivity data. **Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology**, v. 30, p. 1985–2005, Set 2013.

PYTHONOLOGY. **Python Success Stories**. 2015. Acesso em: 4 de Agosto de 2015. Disponível em: <<http://www.pythonology.org>>.

QI, W. **3D Interaction with Scientific Data: An experimental and perceptual approach**. Tese (Doutorado) — Technische Universiteit Eindhoven, 2008.

RIGNEL, D. G. de S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica**, v. 01, n. 1, p. 17–28, 2011.

RINEHART, R. E. **Radar for Meteorologists**. 4. ed. Columbia: Rinehart Publications, 2004.

SANTOS, T. N. dos. **Redes neurais artificiais e relação ZR aplicadas à estimativa de chuva**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos para Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2014.

SAUVAGEOT, H. **Radar Meteorology**. 1. ed. [S.l.]: Artech House Publishers, 1992.

SCHROEDER, W. J.; AVILA, L. S.; HOFFMAN, W. Visualizing with vtk: a tutorial. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 20, n. 5, p. 20–27, 2000.

SCHUUR, T. J.; PARK, H.-S.; RYZHKOV, A. V.; REEVES, H. D. Classification of precipitation types during transitional winter weather using the ruc model and polarimetric radar retrievals. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 51, p. 763–779, Apr 2012.

SELTMANN, J. E. E. Quantitative aspects of clutter highpass filtering as used by dwf. In: **30th International Conference on Radar Meteorology**. [S.l.: s.n.], 2001.

SELUZNIAK, R. H. L.; BURIOL, T. M.; BENETI, C.; SCHEER, S. Ampliando a interação para aumentar a compreensão na visualização de dados de radares meteorológicos. In: **V SMNC**. [S.l.: s.n.], 2015.

SELUZNIAK, R. H. L.; BURIOL, T. M.; BENETI, C.; SCHEER, S. Buscando eficiência no controle de qualidade em dados de radares meteorológicos. In: **XLVII SBPO**. [S.l.: s.n.], 2015.

SILVA NETO, M. A. **Mineração visual de dados: extração do conhecimento a partir das técnicas de visualização da informação e mineração de dados**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos para Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2008.

SILVEIRA, R. **Recognition of clutter in weather radars using polarization diversity information and artificial neural networks**. Tese (Doutorado) — University of Essex, 1998.

STEINER, M.; SMITH, J. A. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, American Meteorological Society, n. 19, p. 673–686, 2002.

STEINER, M.; SMITH, J. A.; KESSINGER, C.; FERRIER, B. S. Evaluation of algorithm parameters for radar data quality control. **29th Int. Conf. on Radar Meteorology**, Montreal, QC, Canada, p. 582–585, 1999.

SWEIGART, A. **Making Games with Python & Pygame**. 1. ed. [S.l.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.

TANG, L.; ZHANG, J.; LANGSTON, C.; KRAUSE, J.; HOWARD, K.; LAKSHMANAN, V. A physically based precipitation–nonprecipitation radar echo classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system. **Weather and Forecasting**, v. 29, p. 1106–1119, Oct 2014.

TORY, M.; MÖLLER, T. Human factors in visualization research. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, IEEE Educational Activities Department, Piscataway, NJ, USA, v. 10, n. 1, p. 72–84, jan. 2004.

VTK. **The Visualization Toolkit**. 2014. Acesso em: 11 de Julho de 2014. Disponível em: <<http://www.vtk.org>>.

WALT, S. van der; COLBERT, S.; VAROQUAUX, G. The numpy array: A structure for efficient numerical computation. **Computing in Science Engineering**, v. 13, n. 2, p. 22–30, March 2011.

WANG, H. Engaging students with game programming in python. In: **WCECS 2009**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1.

WOLFF, C. **Anomalous Propagation**. 2015. Acesso em: 16 de Novembro de 2015. Disponível em: <<http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa17.en.html>>.

ZHANG, J.; HOWARD, K.; GOURLEY, J. J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. **JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY**, v. 22, p. 30–42, 1 2005.