



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.14.19.50-TDI

**USO DE IMAGENS SAR ORBITAIS EM DESASTRES  
NATURAIS: MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES E  
DESLIZAMENTOS DE TERRA OCORRIDOS EM  
NOVEMBRO DE 2008 NO VALE DO ITAJAÍ-SC**

Rogério Ribeiro Marinho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Waldir Renato Paradella, e Camilo Daleles Rennó, aprovada  
em 12 de maio de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39GFQKE>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

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

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

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

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

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.14.19.50-TDI

**USO DE IMAGENS SAR ORBITAIS EM DESASTRES  
NATURAIS: MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES E  
DESLIZAMENTOS DE TERRA OCORRIDOS EM  
NOVEMBRO DE 2008 NO VALE DO ITAJAÍ-SC**

Rogério Ribeiro Marinho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Waldir Renato Paradella, e Camilo Daleles Rennó, aprovada  
em 12 de maio de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39GFQKE>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Marinho, Rogério Ribeiro.

Ma33u      Uso de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento de inundações e deslizamentos de terra ocorridos em novembro de 2008 no Vale do Itajaí-SC / Rogério Ribeiro Marinho. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xxx+141 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.14.19.50-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Waldir Renato Paradella, e Camilo Daleles Rennó.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Imagens SAR. 3. Desastres naturais. 4. Inundação. 5. Deslizamento de terra. I.Título.

CDU 528.8. 044.2 (814.4)

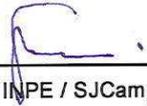
---

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

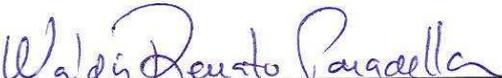
Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dra. Evelyn Marcia Leão de Moraes Novo

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Waldir Renato Paradella

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Athos Ribeiro dos Santos

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luiz Eduardo Mantovani

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UFPR / Curitiba - PR

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Rogério Ribeiro Marinho

São José dos Campos, 12 de maio de 2011



*“Pouco conhecimento faz com que as criaturas se tornem orgulhosas. Muito conhecimento, que se tornem humildes”.*

*Leonardo Da Vinci*



*A minha família, especialmente para minha mãe Nilza e minha irmã Rai, pelo apoio e incentivo para a minha formação pessoal e acadêmica.*



## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Dr. Waldir Renato Paradella e Dr. Camilo Daleles Rennó, pela motivação, atenção e por acreditar em minha potencialidade para desenvolver este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro do processo 131205/2009-9.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por oferecer instalações, equipamentos e suporte para a realização deste trabalho. Aos professores, pesquisadores e técnicos da Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) por fazerem desta instituição uma referência.

À MDA Geospatial Services Inc. (MDA GSI) e Infoterra GmbH, pelo fornecimento das imagens RADARSAT-2 e TerraSAR-X, respectivamente. À Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (FATMA) pela cessão do mapeamento temático digital do estado. Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Superintendência Regional de Porto Alegre, por disponibilizar a carta geológica. À Dra. Beate Frank (FURB) pela cessão do material bibliográfico sobre a região do Vale do Itajaí.

Aos professores do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Dr. Joel Pellerin e Dr. Juan Antonio Altamirano Flores, e ao Geógrafo Harideva Égas pelo apoio na realização do trabalho de campo e por ceder material fotográfico utilizado nesta pesquisa.

A minha família, que sempre me incentivou. Aos irmãos de coração Arnaldo, Cleber e Thiago Rodrigues, pela amizade, companheirismo e atenção prestada.

Aos colegas e amigos da turma PGSER 2009 pela companhia e por compartilhar as alegrias e ansiedades vividas ao longo do curso. Aos estimados amigos “Diretores” César, Enrique, Gavlak, Hiran, Kleber, Pedro, Raian e Thiago Bertani, companheiros nos momentos “*finus e tensos*”.

Aos amigos de graduação e professores do curso de Geografia da UFAM, em especial à Dra. Tatiana Schor, Msc. Maria Angélica Cavicchiolli, Dr. José Aldemir de Oliveira e Dr. Eduardo Pinheiro.

E finalmente, à Adriana Andion e sua família, pela amizade, carinho, apoio e pelos bons momentos vividos.

## RESUMO

Em novembro de 2008, o estado de Santa Catarina foi afetado por um evento atmosférico extremo que ocasionou uma elevada quantidade de chuva sobre a região leste do estado e resultou em grandes inundações e deslizamentos de terra. Devido à intensa cobertura de nuvens, não foi possível adquirir imagens com sensores remotos que operam no espectro óptico. Por outro lado, radares imageadores de abertura sintética (SAR) de diferentes sistemas orbitais (ALOS/PALSAR, ENVISAT/ASAR, RADARSAT-2 e TerraSAR-X) coletaram imagens sobre a região. Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial deste acervo de imagens SAR multitemporais, adquiridas sobre a região do Vale do Itajaí para o monitoramento de áreas afetadas por inundações e para detecção de cicatrizes de deslizamentos de terra. As imagens no formato amplitude foram ortoretificadas, filtradas para redução do ruído *speckle* e convertidas para coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ). O mapeamento das áreas inundadas foi realizado por meio do classificador não supervisionado ISODATA com as imagens em  $\sigma^0$ . Os resultados mostraram que imagens SAR com distintas datas de aquisição e configurações (frequência, geometria de visada e resolução espacial), permitiram a identificação de manchas de inundações e de áreas de vegetação alagada, bem como a detecção da variabilidade temporal das áreas afetadas. A identificação das cicatrizes de deslizamentos foi realizada por meio da análise visual da imagem de alta resolução espacial TerraSAR-X. O modelo fotointerpretativo desenvolvido para o mapeamento de deslizamentos de terra possibilitou identificar cicatrizes sobre vertentes não afetadas por distorções do tipo *foreshortening* e *layover*. O acerto do mapeamento das cicatrizes foi de 81%, apesar do ângulo de incidência da imagem TerraSAR-X utilizada na pesquisa não ser o mais adequado devido ao relevo montanhoso. A influência dos parâmetros do sensor e do alvo no mapeamento das cicatrizes foi também analisada. A investigação mostrou que a combinação do uso da classificação digital para o mapeamento das áreas inundadas e análise visual para a detecção de cicatrizes de deslizamento é adequada para a caracterização dos eventos e elaboração de mapeamento de áreas afetadas com rapidez e precisão. O uso da informação fornecida por sensores SAR orbitais se mostrou estratégica para ações de gerenciamento de áreas afetadas por desastres naturais, tal qual foi demonstrado para o evento ocorrido em Santa Catarina no final de 2008.



**USE OF ORBITAL SAR IMAGES IN NATURAL DISASTERS: MAPPING OF FLOOD AND  
LANDSLIDES OCCURRED IN NOVEMBER 2008 IN THE ITAJAÍ VALLEY (SANTA  
CATARINA STATE)**

**ABSTRACT**

In November 2008, the state of Santa Catarina was affected by extreme atmospheric events that caused a high amount of heavy rain over the eastern region of the state and resulted in extensive floods and landslides. Due the intense cloud cover, it was not possible to collect images with sensors operating in the optical spectrum. However, Synthetic Aperture Radars (SAR) of different orbital systems (ALOS/PALSAR, ENVISAT/ASAR, RADASAT-2 and TerraSAR-X) have acquired data in the region. Thus, this research intended to assess the potential of this multitemporal radar dataset acquired over the Itajai Valley (northeastern border of the state) for monitoring of flood areas and detection of landslide scars. The images were orthorectified, filtered for speckle noise reduction and further converted to backscattering coefficient (sigma nought =  $\sigma^0$ ). The mapping of flooded areas was accomplished through the usage of the unsupervised ISODATA classifier based on  $\sigma^0$  images. The results showed that SAR images with different acquisition dates and attributes (frequency, viewing geometry, spatial resolution) have allowed the identification of flood patches, the areas of flooded vegetation and the detection of the temporal variability of the affected areas. The identification of landslide scars was carried out by visual analysis of the high spatial resolution TerraSAR-X data. The photointerpretation model for the landslide mapping has allowed to identify scars located on the slopes, which were not affected by foreshortening and layover effects. The mapping accuracy of the scars was 81%, although the TerraSAR-X incidence used in the investigation was not the most suitable due to the mountainous relief. The influence of sensor and target parameters in the mapping scars was also analyzed. The investigation has shown that the integration of classification for mapping of flooded areas and visual analysis for landslide detection was suitable in order to provide information quickly and accurately. The use of the information derived from orbital SAR sensors proved to be strategic for the management actions in areas affected by natural disasters, such as it was demonstrated for the events that occurred in Santa Catarina at the end of 2008.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Tipos de espalhamento do sinal SAR sobre diferentes superfícies.....	6
Figura 2.2 – Representação lateral e frontal dos atributos de uma onda eletromagnética.....	7
Figura 2.3 – Geometria de imageamento de um sensor SAR.....	09
Figura 2.4 – Influência da vegetação e de condições de umidade no retroespalhamento do sinal SAR.....	12
Figura 2.5 – Tipos de distorções causadas em imagens SAR.....	13
Figura 2.6 – Representação de uma planície de inundação.....	19
Figura 2.7 – Tipos de vertentes visualizadas por meio de perfil.....	23
Figura 2.8 – Representação dos tipos de escorregamento rotacional (a) e translacional (b).....	25
Figura 2.9 – Representação corridas de massa ou detriticas (a). Escorregamentos complexos observados na região do Morro do Baú-SC (b).....	26
Figura 2.10 – Modos de operação PALSAR.....	30
Figura 2.11 – Modos de imageamento RADARSAT 2.....	32
Figura 2.12 – Modos de imageamento TerraSAR-X.....	33
Figura 3.1 – Localização das áreas de estudo.....	35
Figura 3.2 – Unidades tectônicas da área de estudo.....	38
Figura 3.3 – Unidades geológicas da área de estudo.....	39
Figura 4.1 – Disposição das imagens SAR adquiridas sobre o Vale do Itajaí.....	47
Figura 4.2 – Precipitação registra na estação pluviométrica de Blumenau.....	48

Figura 4.3 – Precipitação diária observada para o período de aquisição das imagens FBD/PALSAR .....	48
Figura 4.4 – Precipitação diária observada para o período de 01 a 31 de outubro de 2008.....	49
Figura 4.5 – Precipitação diária observada para o período de 01 de novembro a 05 de dezembro de 2008.....	49
Figura 4.6 – Precipitação diária observada para o mês de dezembro de 2008.....	50
Figura 4.7 – Precipitação diária observada para o mês de janeiro de 2009 e data de aquisição da imagem FBS/PALSAR.....	50
Figura 4.8 – Fluxograma referente às etapas desenvolvidas ao longo da pesquisa.....	51
Figura 4.9 – Fluxograma referente à etapa de trabalho 1.....	52
Figura 4.10 – Distribuição espacial dos ICPs utilizados na validação da planimetria.....	55
Figura 4.11 – Fluxograma referente à etapa 2.....	56
Figura 4.12 – Máscara de áreas com relevo com declividade até 8° .....	57
Figura 4.13 – Classes de interesse a serem mapeadas.....	58
Figura 4.14 – Corpos d’água antes da inundação e áreas inundadas.....	59
Figura 4.15 – Vegetação alagada sobre a área em estudo.....	60
Figura 4.16 – Fluxograma da etapa 3, mapeamento dos deslizamentos de terra.....	63
Figura 4.17 – Representação em perfil da geometria de imageamento SAR sobre áreas de vertente.....	65
Figura 4.18 – Fotografias de cicatrizes de deslizamentos sobre a região do Morro do Baú.....	66
Figura 4.19 – Composição da textura sobre uma imagem SAR.....	67

Figura 4.20 – Padrão de resposta de feições de escorregamento de terra sobre ortoimagem TerraSAR-X.....	68
Figura 4.21 – Exemplo da obtenção de direção do movimento de um deslizamento de terra.....	69
Figura 5.1 – Composição colorida (R) FBD/PALSAR (banda L-HH) de 01/10/08; (G) STD5/RST-2 (banda C-HH) de 28/11/08; (B) SM/TSX (banda X-HH) de 01/12/08.....	73
Figura 5.2 – Sequência temporal da mancha de inundação sobre a região de Gaspar.....	74
Figura 5.3 – <i>Box Plot</i> com os valores de $\sigma^0$ (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.....	76
Figura 5.4 – Resultado da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR (polarização L-HH) de 14/09/2008.....	80
Figura 5.5 – Resultado da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR (polarização L-HH) de 01/10/2008.....	81
Figura 5.6 – Mapa de distribuição de corpos de água antes do desastre de 2008.....	82
Figura 5.7 – Resultado da classificação da ortoimagem ASAR (polarização C-HH) de 27/11/2008.....	83
Figura 5.8 – Resultado da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 (polarização C-HH) de 28/11/2008.....	84
Figura 5.9 – Resultado da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 (polarização C-HH) de 30/11/2008.....	85
Figura 5.10 – Resultado da classificação da ortoimagem SM/TSX (polarização X-HH) de 01/12/2008.....	86
Figura 5.11 – Resultado da classificação da ortoimagem FBS/PALSAR (polarização L-HH) de 30/01/2009.....	87
Figura 5.12 – Classificações de área inundada sobre a área de relevo montanhoso.....	90

Figura 5.13 – Mapa de áreas inundadas e de vegetação alagada detectada pelos diferentes sensores SAR durante o período de 27/11 a 01/12/2008.....	91
Figura 5.14 Área inundada próxima ao canal do Rio Itajaí-açu.....	92
Figura 5.15 Fotografia da área inundada próxima ao canal do Rio Itajaí-açu.....	93
Figura 5.16 – Sequência temporal dos corpos d’água e de vegetação alagada, detectados pelos diferentes sensores SAR.....	96
Figura 5.17 – Área ocupada por manchas de inundação detectada pelos diferentes sensores SAR e quantidade de chuva acumulada.....	97
Figura 5.18 – Área ocupada por vegetação alagada detectada pelos diferentes sensores SAR e quantidade de chuva acumulada.....	98
Figura 5.19 – Detalhe do resultado da operação de filtragem do ruído <i>speckle</i> . A) imagem não filtrada e não ortorretificada, B) imagem filtrada e ortorretificada.....	99
Figura 5.20 – Detalhe do resultado do processo de ortorretificação.....	100
Figura 5.21 – Visualização em perspectiva da ortoimagem SM/TSX sobreposta sobre o DEM.....	101
Figura 5.22 – Cicatriz de deslizamento #1.....	102
Figura 5.23 – Cicatriz de deslizamento #2.....	103
Figura 5.24 – Contraste entre área movimentada e não movimentada.....	105
Figura 5.25 – Grande cicatriz sobre estrada de Luis Alves.....	106
Figura 5.26 – Deslizamento sobre um trecho meândrico do Ribeirão do Baú.....	107
Figura 5.27 – Fotografia de campo da cicatriz de deslizamentos sobre o Ribeirão do Baú.....	108
Figura 5.28 – Distribuição dos pontos visitados em trabalho de campo sobre a ortoimagem SM/TSX.....	110

Figura 5.29 – Fotografias de campo obtidas durante sobrevoo da área do PC2.....	111
Figura 5.30 – Diagrama de roseta mostrando a direção de movimento das cicatrizes corretamente mapeadas sobre a ortoimagem SM/TSX.....	111
Figura 5.31– Feições lineares erroneamente identificadas como cicatriz.....	112
Figura 5.32 – Áreas erroneamente identificadas como cicatriz.....	112
Figura 5.33 – Diagrama de roseta mostrando a direção de movimento das cicatrizes não detectadas com a ortoimagem TSX.....	114
Figura 5.34 – Cicatrizes de deslizamento com orientação de movimento sobre as faces oeste e leste das encostas.....	115
Figura 5.35 – Cicatrizes não identificadas na Ortoimagem TSX.....	115



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Parâmetros do sensor e do alvo que influenciam no retroespalhamento.....	7
Tabela 2.2 – Agências membros do International Charter e seus respectivos satélites.....	17
Tabela 2.3 – Detalhes sobre os modos de operação PALSAR.....	30
Tabela 2.4 – Modos de imageamento do sensor ASAR.....	31
Tabela 2.5 – Detalhes sobre os modos de operação RADARSAT-2.....	32
Tabela 2.6 – Detalhes sobre os modos de operação TerraSAR-X.....	33
Tabela 3.1 – Unidades Geológicas da área em estudo.....	39
Tabela 4.1 – Resumo das características gerais das imagens SAR.....	45
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na execução do ISODATA.....	61
Tabela 5.1. Acurácia planimétrica das ortoimagens SAR.....	71
Tabela 5.2 – Exatidão global e índice kappa para as classificações realizadas nas sete ortoimagens SAR.....	88
Tabela 5.3 – Exatidão do produtor e do usuário (%) para as classificações realizadas nas ortoimagens SAR.....	89
Tabela A.1 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem ASAR.....	133
Tabela A.2 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem ASAR.....	133
Tabela A.3 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem STD5/RST-2 Ascendente.....	134

Tabela A.4 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem STD5/RST-2 Ascendente.....	134
Tabela A.5 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem STD5/RST-2 Descendente.....	135
Tabela A.6 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem STD5/RST-2 descendente.....	135
Tabela A.7 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem FBD/PALSAR.....	136
Tabela A.8 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem FBD/PALSAR.....	136
Tabela A.9 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem FBS/PALSAR. ....	137
Tabela A.10 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem FBS/PALSAR. ....	137
Tabela A.11 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão ortoimagem TerraSAR-X.....	138
Tabela A.12 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem TerraSAR-X.....	138
Tabela B.1 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR de 14/09/2008.....	139
Tabela B.2 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR de 01/10/2008.....	139
Tabela B.3 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem ASAR.....	139
Tabela B.4 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 Ascendente.....	139

Tabela B.5 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 Descendente.....	140
Tabela B.6 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem TerraSAR-X.....	140
Tabela B.7 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem FBS/PALSAR.....	140
Tabela C.1 – Coordenadas planimétricas das cicatrizes de escorregamento mapeadas na ortoimagem TerraSAR-X X e verificadas em campo.....	141



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
AMI/SAR	<i>Active Microwave Instrument - SAR</i>
ASAR	<i>Advanced Synthetic Aperture Radar</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CMAS	<i>Circular Map Accuracy Standard</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
ENVISAT	<i>Environmental Satellite</i>
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural e Santa Catarina S.A
ERS	<i>European Remote Sensing satellite</i>
ESA	Agência Espacial Europeia
FBD	<i>Fine Beam Dual polarization</i>
FBS	<i>Fine Beam Single polarization</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H	Onda com polarização horizontal
HH	Polarização do tipo horizontal - horizontal
HV	Polarização do tipo horizontal - vertical
ICP	<i>Independet Check Point</i>
IGCE	Instituto de Geociências e Ciências Exatas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	Interferometria SAR

JAXA	<i>Japanese Space Exploration Agency's</i>
JERS	<i>Japanese Earth Resources Satellite</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
PALSAR	<i>Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar</i>
RAR	Radar de Abertura Real
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RST-2	RADARSAT-2
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SM	<i>Stripmap</i>
STD5	<i>Standard 5</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
V	Onda com polarização vertical
VH	Polarização do tipo vertical – horizontal
VV	Polarização do tipo vertical – vertical
WGS 84	<i>World Geodetic System 1984</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo de incidência
$\sigma^{\circ}$	Coefficiente de retroespalhamento
$\lambda$	Comprimento de onda
dB	Decibéis
$\uparrow$	Direção de movimento do deslizamento de terra
$\wedge$	Ruptura da cicatriz de deslizamento de terra



## SUMÁRIO

Pág

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Contexto e justificativa.....	1
1.2.	Objetivo geral .....	4
1.3.	Estrutura do documento .....	4
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
2.1.	Sistema de imageamento SAR .....	5
2.1.1.	Parâmetros do sensor .....	7
2.1.2.	Parâmetros do alvo .....	10
2.1.3.	Distorções e geometria de imageamento.....	13
2.1.4.	Interpretação visual de imagens SAR.....	13
2.2.	Desastres naturais e sensoriamento remoto.....	16
2.3.	Processos fluviais.....	17
2.3.1.	Mapeamento de inundações em imagens SAR.....	19
2.4.	Dinâmica de vertentes .....	22
2.4.1.	Movimentos de massa .....	24
2.4.1.1.	Detecção de deslizamentos de terra com imagens SAR .....	26
2.5.	Sistemas SAR orbitais .....	29
2.5.1.	O sensor PALSAR (satélite ALOS).....	29
2.5.2.	O sensor ASAR (satélite ENVISAT) .....	30
2.5.3.	O satélite RADARSAT-2.....	31
2.5.4.	O satélite TerraSAR-X .....	32
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>35</b>
3.1.	Localização das áreas teste .....	35
3.2.	Clima.....	36
3.3.	Hidrografia.....	36
3.4.	Geologia.....	37
3.5.	Solos .....	40
3.6.	Aspectos geomorfológicos .....	41
3.7.	Cobertura vegetal e uso da terra .....	41
3.8.	Desastres naturais no Vale do Itajaí.....	43

<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
4.1.	Material .....	45
4.1.1.	Dados de Precipitação .....	47
4.2.	Abordagem metodológica.....	51
4.2.1.	Preparação da base de dados .....	51
4.2.2.	Extração e análise das áreas inundadas.....	56
4.2.3.	Detecção das cicatrizes de deslizamentos de terra .....	63
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>71</b>
5.1.	Avaliação planimétrica das ortoimagens SAR .....	71
5.2.	Mapeamento da inundação .....	728
5.2.1.	Identificação de áreas inundadas utilizando dados SAR multitemporais e multissensor .....	72
5.2.2.	Análise exploratória do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) .....	75
5.2.3.	Classificação das áreas inundadas.....	79
5.2.4.	Inundação detectada no Vale Do Itajaí .....	91
5.2.5.	Dinâmica temporal da inundação sobre a região de Gaspar.....	94
5.3.	Mapeamento das cicatrizes de deslizamentos de terra .....	99
5.3.1.	Detecção de cicatrizes de deslizamentos na imagem TerraSAR-X .....	99
5.3.2.	Avaliação do mapeamento das cicatrizes de deslizamentos .....	109
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>117</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>141</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Contexto e justificativa**

Nos últimos anos grandes desastres naturais têm ocorrido em diversas regiões do mundo. De certa forma, devido a sua localização geográfica, o Brasil não está sujeito a desastres naturais de grandes proporções relacionados à dinâmica interna da Terra, como os terremotos, tsunamis ou erupções vulcânicas. Entretanto, diversos eventos ligados à dinâmica externa da Terra, como inundações e deslizamentos de terra ocorrem em diversas regiões do país, muitas vezes relacionados a adversidades meteorológicas, como a ocorrência de fortes chuvas (TOMINAGA, 2009). Estes episódios de inundações e deslizamentos de terra têm aumentado em intensidade e frequência, causando grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

A identificação de áreas afetadas por eventos de desastres naturais é uma das principais atividades na avaliação dos danos ocorridos e da população afetada, sendo o tempo de realização desse mapeamento um fator fundamental. Neste sentido, o uso de imagens de sensoriamento remoto em desastres naturais possibilita a obtenção informações de forma rápida, permite uma visão sinóptica para avaliação de riscos, auxilia a tomada de decisões, a identificação de áreas vulneráveis e o entendimento das causas e efeitos destes eventos (GILLESPIE et al., 2007; TRALLI et al., 2005).

A aplicação de imagens de sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas afetadas por desastres naturais pode ser realizada por meio de diferentes tipos de imagens, técnicas e abordagens (JOYCE et al., 2009). Sensores ópticos, que operam no espectro do visível e infravermelho, possibilitam a extração de informações espectrais ligadas às características físico-químicas dos alvos na superfície. No entanto, a coleta de dados com estes sensores apresenta limitações na presença de cobertura de nuvens, o que é comum em muitos desastres naturais relacionados a eventos meteorológicos.

Por outro lado, sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que operam no espectro das micro-ondas, podem adquirir imagens em condições atmosféricas adversas, sobre áreas com densa cobertura de nuvens ou fumaça, independentemente de iluminação solar e podem adquirir imagens tanto de dia como de noite. Estes sensores possuem a capacidade de detectar informações geométricas e elétricas de alvos na superfície (PARADELLA et al., 2005). Estas características tornam a aplicação deste tipo de dado uma atividade essencial em ações de gerenciamento de áreas afetadas por desastres naturais, particularmente eventos de inundações e deslizamentos de terra.

No ano de 2008 o estado de Santa Catarina sofreu um dos desastres naturais mais trágicos de sua história. Durante o mês de novembro, a região leste do estado foi atingida por um sistema de instabilidade atmosférica que ocasionou uma elevada quantidade de chuva, principalmente sobre o Vale do Itajaí. Entre os dias 22 e 24 de novembro de 2008 ocorreram chuvas de grandes proporções, que provocaram inundações em áreas urbanas e rurais. Foram registrados cerca de 1.360 mm de precipitação na região de Blumenau entre os meses de outubro e novembro de 2008, sendo que a média climatológica mensal para esta região é 150 mm (SILVA DIAS, 2009).

O grande volume de água saturou o solo das encostas, que deslizaram, resultando em consequências trágicas por toda a região. Serviços básicos como o fornecimento de água, energia elétrica e transporte foram interrompidos, o que levou 14 municípios a decretarem estado de calamidade pública e 63 municípios ficaram em estado de emergência. Na região do morro do Baú, a tubulação do gasoduto Brasil-Bolívia foi rompida devido aos deslizamentos de terra, ocasionando a suspensão do fornecimento de gás para indústrias, postos de combustível e residências em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul.

Segundo a Defesa Civil de Santa Catarina, até o dia 30 de novembro de 2008 haviam 78.707 pessoas desalojadas e desabrigadas e até o dia 31 de dezembro de 2008 foram

registrados 135 óbitos em decorrência principalmente dos deslizamentos, sendo 117 de habitantes do Vale do Itajaí (DEDC-SC, 2009).

Devido à cobertura de nuvens sobre a região, sensores remotos ópticos ficaram impossibilitados de obter imagens sobre as áreas afetadas pelo desastre de 2008. Por outro lado, durante a ocorrência do desastre de 2008, sensores SAR a bordo dos satélites ENVISAT, RADARSAT-2 e TerraSAR-X adquiriram imagens logo após as fortes chuvas. Estes dados, em conjunto com imagens PALSAR do satélite ALOS obtidas antes e depois da inundação, constituem um acervo valioso e inédito no país para propósitos de análise multitemporal deste tipo de evento. Além disso, permitem explorar o potencial do uso de imagens SAR com diferentes atributos (frequência, resolução espacial, geometria de visada, etc.) no monitoramento de áreas afetadas por inundações.

Desta forma, esta pesquisa investigou as seguintes questões científicas: (1) Qual a contribuição do uso de imagens SAR adquiridas por diferentes sensores, isolados e combinados, para o mapeamento de áreas inundadas sobre o Vale do Itajaí? (2) Qual a eficiência de imagem SAR, de alta resolução espacial, para fins de identificação de cicatrizes de deslizamentos de terra na região do Morro do Baú, município de Ilhota?

Para avaliar estas questões, esta pesquisa utilizou métodos e técnicas para o processamento e análise de imagens SAR visando obter informações de forma rápida para o atendimento emergencial de áreas atingidas por inundações e deslizamentos de terra. O item a seguir apresenta os objetivos da pesquisa buscou alcançar.

## **1.2. Objetivo geral**

Esta dissertação tem como objetivo principal avaliar o uso potencial de imagens SAR, adquiridas por diferentes sensores orbitais, para o mapeamento de áreas afetadas por inundações e deslizamentos de terra, na região do Vale do Itajaí, estado de Santa Catarina. Para isto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Detectar a inundação sobre a região do médio e baixo curso do rio Itajaí-açu por meio de imagens adquiridas por diferentes sensores SAR;
- Mapear a dinâmica temporal da inundação sobre a região de Gaspar;
- Avaliar o uso de imagem TerraSAR-X, modo Stripmap, para a identificação de cicatrizes de deslizamentos de terra sobre a região do complexo do Morro do Baú, Ilhota - SC.

## **1.3. Estrutura do documento**

Este documento foi estruturado em seis capítulos: após a introdução e contextualização no capítulo inicial, o capítulo dois aborda os principais conceitos sobre imagens SAR e outros temas explorados neste trabalho. No capítulo três são descritas as principais características da área de estudo. O material e a abordagem metodológica utilizada para a realização deste trabalho são tratados no capítulo quatro. No capítulo cinco são apresentados os resultados e discussões. Por fim, as conclusões e recomendações deste trabalho são apresentadas no capítulo seis.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Sistema de imageamento SAR

Sistemas de sensoriamento remoto SAR, são sensores ativos (geram sua própria energia), com princípios e instrumentos diferentes dos sistemas passivos que operam na faixa do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético. Seu desenvolvimento teve início a partir da década de 1950 com os radares de abertura real (RAR). Os sensores SAR correspondem ao avanço na tecnologia em relação aos sistemas RAR anteriores.

Sistemas SAR emitem sinal em direção à superfície terrestre e registra o retorno deste sinal após a interação com os alvos, retorno este denominado de retroespalhamento. A grandeza radiométrica que representa quantitativamente o retroespalhamento é o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ), que por sua vez, varia em função dos parâmetros do sensor (comprimento de onda, polarização, geometria de imageamento) e das propriedades do alvo (forma, tamanho, orientação do alvo em relação ao sensor e constante dielétrica).

A interação da energia com a matéria na região de micro-ondas do espectro eletromagnético segue o pressuposto que o espalhamento da radiação ocorre quando ondas na região das micro-ondas trafegam de um meio para outro, e entre estes diferentes meios exista uma diferença em uma propriedade denominada constante dielétrica. Assim, quanto maior for a diferença em constante dielétrica, maior a quantidade de retroespalhamento (ELACHI e VAN ZYL, 2006).

A constante dielétrica de um material é um indicador da resistência à propagação da onda eletromagnética através de um material, em comparação com o vácuo. No vácuo a onda eletromagnética possui velocidade constante, sendo que em outros meios, a velocidade é menor. Por convenção, o ar possui constante dielétrica igual à do vácuo, ou seja, 1, já a água para a região de micro-ondas de 3 cm tem constante dielétrica

igual a 64. Isto significa que nesta região do espectro, a radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas ao trafegar no meio água o fará com uma velocidade 64 vezes menor que a do ar ou vácuo. Devido a esse alto contraste, quando um sinal SAR atinge uma superfície d'água, a maior parte da energia é espalhada da superfície. Se essa superfície for plana, o retorno do sinal ocorrerá em trajetória oposta e de mesmo valor do ângulo de incidência (reflexão especular). Se a superfície for rugosa o sinal terá parte de sua energia espalhada em várias direções (espalhamento difuso), incluindo na direção da antena do SAR. Outro tipo de espalhamento é o por dupla reflexão (*double bounce*), ocorrendo em alvos dispostos com geometria ortogonal, como entre troncos de árvores e o solo ou vegetação emersa em lâmina d'água (Figura 2.1).

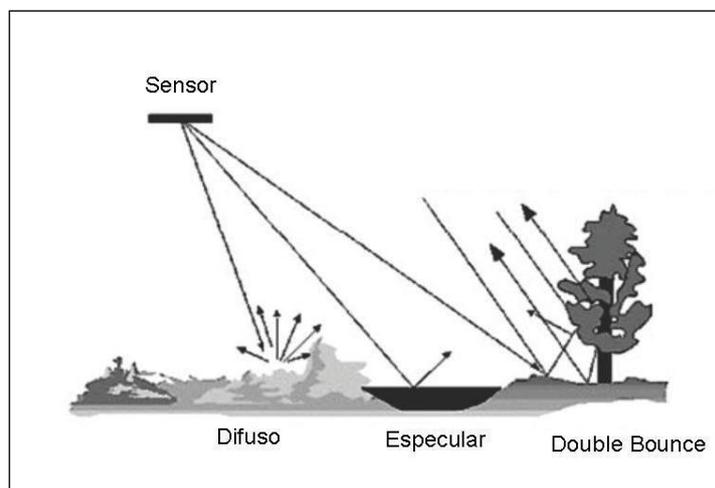


Figura 2.1 – Tipos de espalhamento do sinal SAR sobre diferentes superfícies.

Fonte: Adaptado de Canada Centre for Remote Sensing (1997).

Segundo Lewis e Henderson (1998), os principais parâmetros que condicionam o retroespalhamento do radar estão relacionados ao sensor e ao alvo (Tabela 2.1), com a descrição a seguir dos considerados mais relevantes para este trabalho.

Tabela 2.1 – Parâmetros do sensor e do alvo que influenciam no retroespalhamento.

Parâmetros do sensor	Parâmetros do alvo
Frequência ou Comprimento de onda	Rugosidade da superfície
Polarização	Constante dielétrica
Ângulo de incidência	Inclinação e Orientação
Azimute de visada	
Resolução espacial	

Fonte: Adaptado de Lewis; Henderson (1998).

### 2.1.1. Parâmetros do sensor

Os atributos básicos do sinal emitido e recebido pelo sensor SAR são: comprimento de onda ( $\lambda$ ), amplitude, polarização e fase (VAN DER SANDEN, 1997). Em um modelo senoidal de descrição de trajetória do sinal, o comprimento de onda corresponde à distância percorrida para que o sinal complete um ciclo. Amplitude se refere ao desvio máximo em altura da onda, sendo um indicador da intensidade do sinal. A informação de fase indica a posição de vibração da onda no senóide, para um dado tempo e varia de 0 a  $2\pi$ . Já a polarização de uma onda eletromagnética pode ser definida como a orientação do vetor do campo elétrico, sendo que para sensores SAR esta orientação é frequentemente linear, ou seja, horizontal (H) ou vertical (V). A Figura 2.2 mostra cada um destes atributos de um sinal SAR presente em uma onda eletromagnética.

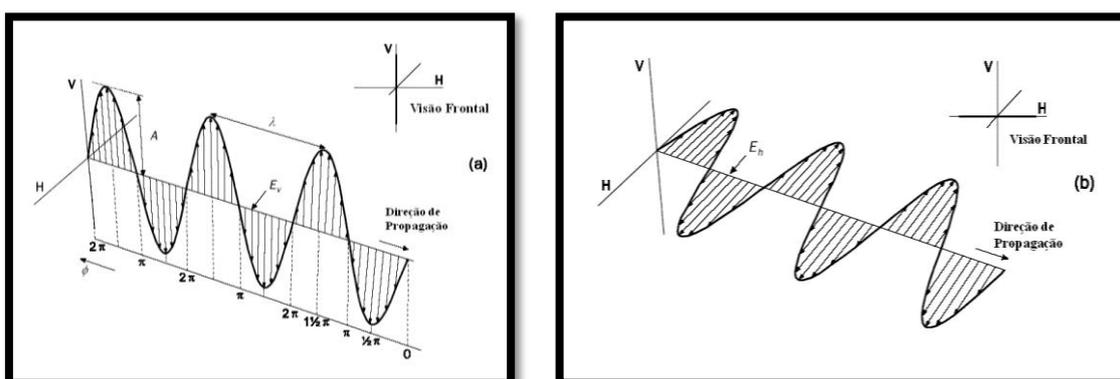


Figura 2.2 – Representação lateral e frontal dos atributos de uma onda eletromagnética. (a) Onda com polarização vertical - V. (b) Onda com polarização horizontal - H.  $\lambda$ : comprimento de onda, A: amplitude,  $\phi$ : fase.

Fonte: Adaptado de Van Der Sanden (1997).

O comprimento de onda é uma variável importante por estar relacionada com a profundidade de penetração da radiação nos alvos na superfície, que em conjunto com outros fatores, como solo, cobertura da vegetação e constante dielétrica, controla o retroespalhamento (NOVO e COSTA, 2005). A respeito da penetração da radiação sobre o dossel da vegetação, sistemas com banda X registram a interação da radiação com o topo deste dossel, enquanto que sensores na banda C interagem no topo e no interior do dossel. Já sensores com banda L são capazes de fornecer medidas da interação do sinal com o interior do dossel e da superfície do terreno. De forma geral, em superfícies com cobertura vegetal, quanto maior o comprimento de onda, maior a penetração no dossel desta vegetação (VAN DER SANDEN, 1997). Esta variação na profundidade de penetração depende ainda de outros parâmetros, como a polarização e o ângulo de incidência.

A polarização possui forte influência na capacidade de identificação e delimitação de alvos. A polarização HH é mais sensível na identificação dos objetos dispostos na superfície de forma horizontal. Por outro lado a polarização VV é mais sensível aos objetos dispostos de forma vertical. Henry et al., (2006) analisando imagens SAR nas polarizações HH, HV e VV dos sensores ERS-2 e ASAR/ENVISAT, observaram que a polarização HH possui maior capacidade de delimitação de corpos d'água.

A geometria de imageamento é controlada por variações no ângulo de incidência e no azimute de visada do sensor (Figura 2.3). O ângulo de incidência ( $\theta$ ) é medido no alvo e definido como o ângulo entre a direção de iluminação do radar e a normal à superfície, variando ao longo da faixa de imageamento do alcance próximo (*near range*) ao alcance distante (*far range*). O azimute de visada, ou direção de visada, é definido como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do sensor em sentido horário, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma. Alvos com forma linear e orientação perpendicular à direção de imageamento, apresentam maior retroespalhamento, por outro lado, alvos

ou feições lineares com orientação paralela, apresentam atenuação da resposta retroespalhada.

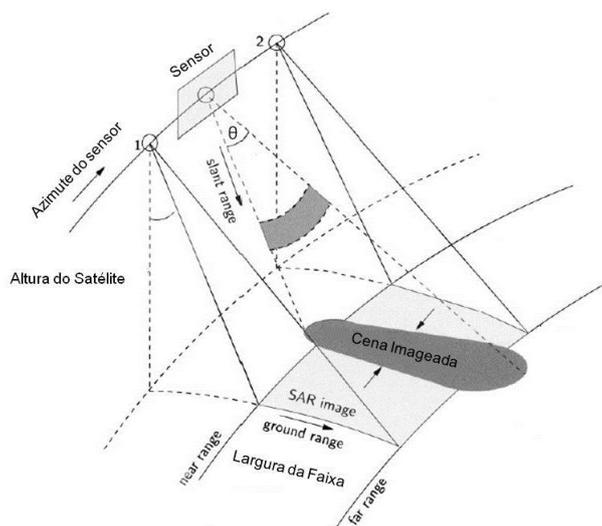


Figura 2.3 – Geometria de imageamento de um sensor SAR.

Fonte: Adaptado de Hanssen (2001).

O ângulo de incidência é um dos principais fatores que influencia a aparência dos alvos em uma imagem SAR e possui forte relação com os efeitos de distorções geométricas (LEWIS e HENDERSON, 1998). Em aplicações nas Geociências, o realce da topografia é fundamental para caracterização da morfologia do terreno. Neste sentido, o ângulo de incidência é um parâmetro importante devido sua relação direta com o sombreamento do relevo e inversa com os efeitos de deslocamento e distorção do relevo (SANTOS et al., 2003).

Em áreas de relevo acidentado, com a presença de serras, vales profundos ou montanhas; rios ou canais de drenagem podem não ser detectados quando ocorrer o imageamento com elevado ângulo de incidência. Singhroy et al., (1998) recomendam que imagens SAR de alta resolução espacial coletadas com ângulo de incidência entre  $40^\circ$  e  $59^\circ$  são as mais apropriadas para a detecção de cicatrizes de deslizamentos. Já a combinação de imagens obtidas com diferentes azimutes de visada (órbita ascendente

e descendente) possibilita maiores chances de identificar alvos como cicatrizes de deslizamentos.

Singhroy e Saint-Jean (1999) analisaram a influência do ângulo de incidência sobre diferentes tipos de relevos. Estes autores recomendam que em áreas de relevo plano, com declividade local de 0° a 15°, pequenos ângulos de incidência (10° a 25°) poderão resultar num melhor realce do terreno, por outro lado uma maior incidência (25° a 59°) também resultará em um realce do terreno aceitável. Sobre ambiente de relevo moderado, com declividade local variando entre 15° a 40°, ângulos de incidência pequenos a intermediários (20° a 35°) podem ser adequados. Já no caso de ambientes de relevo elevado, com presença de áreas com alta declividade (maior que 45°), imagens com ângulos de incidência entre 35° a 59° são as mais recomendadas, para reduzir efeitos de distorções geométricas e de sombreamento do relevo.

Em imagens SAR, a resolução espacial é determinada por meio de duas dimensões: resolução em alcance ou radial (*range*) e resolução em azimute. A resolução em range é medida ao longo da direção de iluminação do radar e depende da duração do pulso emitido. A resolução em azimute é determinada pela largura do feixe de radiação produzida ao longo do deslocamento da antena e tem a ver com sua dimensão longitudinal (a melhor resolução espacial em azimute corresponde à metade desta dimensão).

### **2.1.2. Parâmetros do alvo**

Os parâmetros do alvo que influenciam no retroespalhamento estão principalmente relacionados com as suas propriedades de rugosidade superficial, forma geométrica e à constante dielétrica. Estes parâmetros são responsáveis pela caracterização do padrão tonal e textural das imagens SAR.

A rugosidade superficial em imagens SAR pode ser expressa em componentes de grande e de pequena escala. A componente de grande escala (macrotopografia) está

relacionada com mudanças decamétricas no relevo, enquanto que a componente de pequena escala (microtopografia) está relacionada com variações em escala comparável ao comprimento de onda do SAR, medidas em milímetros ou centímetros (DIERKING, 1999).

A componente de pequena escala pode modular fortemente o brilho das imagens, e dessa forma se pode classificar a rugosidade da microtopografia em três categorias, dependendo do comprimento de onda do sensor: lisa, intermediária e rugosa (ULABY et al., 1982). Rugosidade lisa ocorre quando a superfície reflete grande parte da energia incidente de forma especular e em direção oposta ao sensor. Em imagem SAR isto ocasiona a tonalidade escura dos alvos. Intermediária ocorre quando a energia incidente é refletida pela superfície de uma forma difusa, ocasionando uma tonalidade cinza intermediário na imagem. Já uma superfície rugosa a energia incidente é retroespalhada em todas as direções, ocasionando uma tonalidade cinza médio a cinza claro, devido a uma quantidade significativa de energia retroespalhada na direção do sensor.

A Figura 2.3 exemplifica os diferentes tipos de retroespalhamento de um sinal SAR sobre um ambiente com diferentes condições de umidade do solo, rugosidade e estrutura da vegetação.

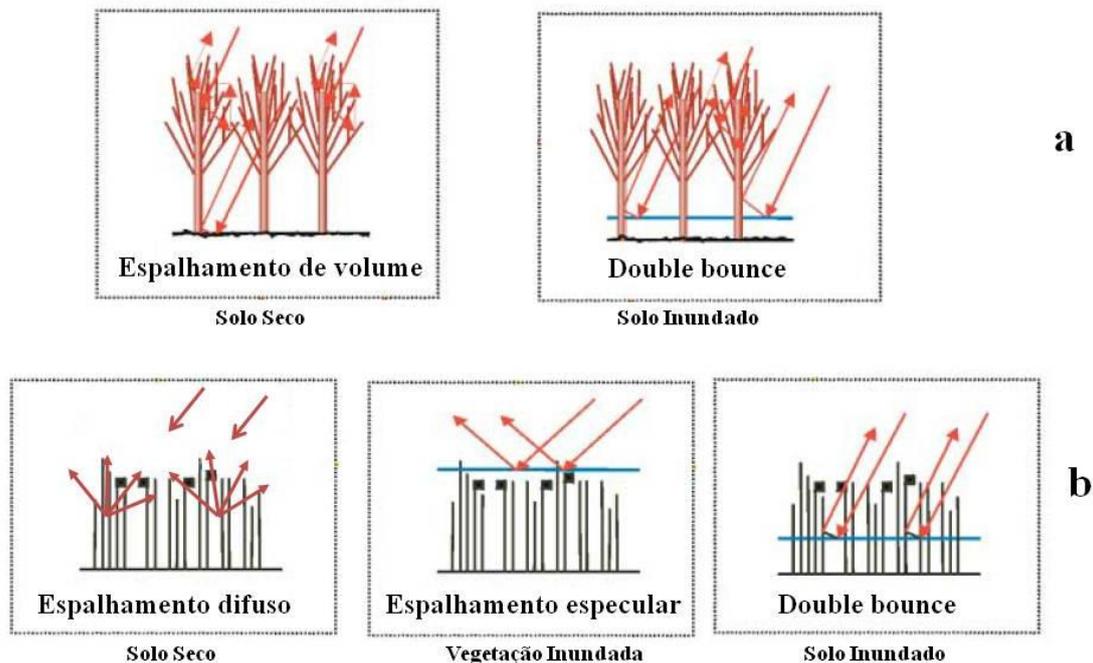


Figura 2.4 – Influência da vegetação e de condições de umidade no retroespalhamento do sinal SAR. a) Vegetação arbórea; b) Vegetação herbácea.

Fonte: Adaptado de Parmuchi et al., (2002).

Em florestas inundadas, o retroespalhamento pode ter maior intensidade devido ao mecanismo de espalhamento do tipo *double bounce*, resultado da interação do sinal entre a camada de água sob a floresta e os troncos de árvores.

Em alguns comprimentos de onda na faixa das micro-ondas, a maioria dos materiais naturais (rochas, solos, etc.) apresenta constante dielétrica entre 3 e 8 quando seco. Já para este mesmo intervalo de comprimento de onda, a água tem uma constante dielétrica de aproximadamente 80. Assim, por meio da constante dielétrica podem-se detectar regiões submetidas a diferentes graus de umidade, sendo que alvos com alto conteúdo de umidade (água, vegetação fotossinteticamente ativa e metais) possuem constante dielétrica alta e com isso resultam em um maior retroespalhamento. Alvos com conteúdo de umidade baixo implicam em uma constante dielétrica baixa e maior penetração do sinal, como em solos áridos (NOVO e COSTA, 2005).

A orientação de um determinado alvo, em relação à geometria de imageamento do sensor SAR, pode influenciar na aparência deste alvo sobre a imagem. Neste sentido, a detecção de cicatrizes de deslizamentos pode variar em função da orientação do movimento do deslizamento em relação ao azimute de iluminação do sensor.

### 2.1.3. Distorções e geometria de imageamento

Os sistemas sensores SAR possuem geometria de visada lateral que pode causar distorções significativas. As distorções geométricas em sistemas SAR (Figura 2.4) correspondem ao sombreamento (*shadow*), encurtamento de rampa (*foreshortening*) e inversão de relevo (*layover*) (LEBERL, 1998). Estas distorções implicam na necessidade de correção geométrica rigorosa em imagens SAR, obtida por meio de ortorretificação (correção geométrica com uso de modelo digital de elevação).

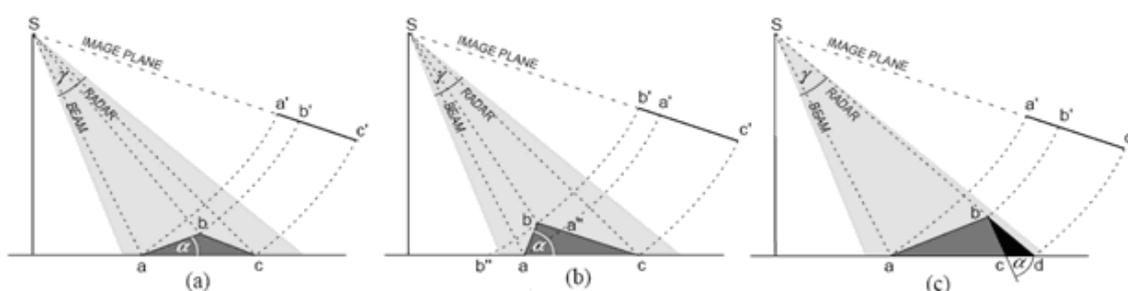


Figura 2.5 – Tipos de distorções causadas em imagens SAR: (a) encurtamento, (b) inversão de relevo, (c) sombra de relevo.

Fonte: Adaptado de Olmsted (1993).

Os efeitos de encurtamento de rampa podem ser reduzidos quando se aumenta o ângulo de incidência, no entanto isto pode levar a um aumento do sombreamento do relevo. Já a inversão de relevo ocorre quando o ângulo de incidência é menor do que o ângulo de declividade da vertente frontal ao sinal SAR. Conforme observado anteriormente, a ocorrência destes tipos de distorções geométricas possui estreita relação com o ângulo de incidência considerado.

#### 2.1.4. Interpretação visual de imagens SAR

No processo de interpretação visual de imagens SAR são considerados os mesmos elementos utilizados em imagens ópticas, como por exemplo, tonalidade, textura, forma, padrão e localização. Porém em imagens SAR estes elementos possuem significados diferentes, uma vez que a resposta dos alvos está relacionada aos parâmetros do sensor e dos alvos (LEWIS e HENDERSON, 1998). Em imagens SAR, variações na tonalidade estão relacionadas a mudanças no valor do retroespalhamento do alvo no terreno (níveis de cinza), que por sua vez estão relacionados aos mecanismos de espalhamento (especular, difuso, volumétrico ou *double bounce*).

A informação de textura em uma imagem SAR representa o grau de rugosidade ou homogeneidade de uma área da imagem, sendo relacionada ao padrão de rugosidade superficial e ao efeito do ruído *speckle*. Atribui-se uma classificação qualitativa das feições com termos como grossa, média, lisa, rugosa ou salpicada. A textura de uma imagem SAR varia em função do comprimento de onda, resolução espacial, ângulo de incidência e composição e arranjo dos elementos no ambiente.

A forma, junto com a tonalidade, é um dos principais elementos no processo de interpretação de imagens SAR. É influenciada pela geometria de imageamento do sensor e da resolução espacial. Geralmente feições antrópicas apresentam formas geométricas regulares ao passo que feições naturais apresentam formas irregulares e regulares.

O padrão estar relacionado ao arranjo espacial dos objetos sobre a superfície, que em imagens SAR pode ser associada em termos de espaçamento, orientação, densidade e uniformidade (SILVA, 2002). De modo geral, o significado atribuído a este e outros elementos de interpretação depende principalmente da configuração da imagem analisada (NOVO, 2008a).

Existem basicamente duas abordagens que podem ser utilizadas para a interpretação de imagens de sensoriamento remoto em Geociências: o método comparativo e o método sistemático (VENEZIANI e ANJOS, 1982). O método comparativo, também conhecido como métodos das chaves, é baseado no estabelecimento de padrões comparativos por meio de uma chave de interpretação, que descreve um conjunto de elementos de interpretação (tonalidade, textura, forma, etc.) que caracteriza o objeto mapeado.

O método lógico e sistemático corresponde a uma abordagem fotointerpretativa proposto por Soares e Fiori (1976) para fotografias aéreas, adaptada posteriormente por Veneziani e Anjos (1982) para a interpretação de imagens de satélite em estudos geológicos. Conforme apresentado em Soares e Fiori (1976), este método pode ser dividido em três fases de processo de análise: a) fotoleitura – com a identificação do elemento de textura da imagem; b) fotoanálise – em que consiste estudar as relações e organização entre as feições de imagem, sua repetição espacial e correspondências com outros elementos da imagem; e c) fotointerpretação – que é a avaliação por métodos indutivos, dedutivos e comparativos do significado dos objetos e suas relações.

Lima (1995) apresenta uma metodologia alternativa de interpretação visual de imagem SAR para a identificação de atributos geológicos sobre o terreno. Denominado de sistemática das chaves, esta abordagem combina aspectos da metodologia das chaves e da análise lógica. Segundo este autor, as principais etapas deste processo são: a) leitura – definição de significado dos elementos da imagem; b) reconhecimento – delimitação de zonas homogêneas por meio da textura e tonalidade; c) identificação – estudo das formas e estruturas do relevo; d) análise – relações das formas do relevo; e) interpretação – definição dos atributos geológicos do terreno.

Santos et al., (2000) apresentaram alguns procedimentos necessário para a interpretação visual de imagens SAR para fins geológicos. Estes procedimentos podem

ser desenvolvidos em três fases: a) definição do tipo de análise – monoscópica, estereoscópica ou integração de imagens; b) definição das características das imagens SAR – ângulo de incidência, azimute de visada, resolução espacial, frequência, polarização; c) interpretação geológica – identificação, análise e interpretação das feições da imagem.

## **2.2. Desastres naturais e sensoriamento remoto**

Segundo UN-ISDR (2009), desastres naturais são perturbações do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade, com perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais sobre uma grande extensão, cujos impactos ultrapassam a capacidade da comunidade ou sociedade afetada de superá-los com seus próprios recursos.

Muitos fenômenos naturais podem provocar desastres de grandes proporções, como por exemplo, terremotos, tsunamis, erupções vulcânicas, ciclones tropicais, inundações, movimentos de massa entre outros. No Brasil, as inundações e os deslizamentos de terra são os desastres naturais com maiores ocorrência, muitas vezes relacionados a eventos pluviométricos intensos e prolongados (TOMINAGA, 2009).

Com o avanço da tecnologia de sensoriamento remoto a partir da década de 1980, o uso deste tipo de dados têm facilitado operações de mapeamento e análise de áreas afetadas por desastres naturais. Através de imagens ópticas e SAR, podem ser produzidos diversos tipos de mapas relacionados à extensão, profundidade, danos ou risco de eventos de inundação (MOEL et al., 2009). Uma discussão sobre as principais formas de uso de imagens de sensoriamento remoto na análise de deslizamentos de terra pode ser observado no trabalho de Metternicht et al., (2005). Segundo estes autores, estes tipo de dados podem ser aplicados para a detecção e identificação, monitoramento, análise e na previsão de áreas susceptíveis.

As imagens de sensoriamento remoto possuem um papel fundamental na análise de áreas atingidas ou susceptíveis a estes tipos de eventos, pois possibilita a coleta de

dados com elevada resolução espacial e temporal, além de fornecer uma visão sinótica do ambiente afetado. Baseado nestas perspectivas, e nas discussões ocorridas durante o “Third United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space” (UNISPACE III), em outubro do ano 2000 as agências espaciais da Europa (ESA), França (CNES) e do Canadá (CSA) iniciaram o programa *International Charter "Space and Major Disasters"*. Este programa tem como objetivo principal criar um sistema unificado de aquisição e entrega de imagens de sensoriamento remoto adquiridas sobre áreas afetadas por desastres naturais ou provocados por atividades antrópicas (THE INTERNATIONAL CHARTER, 2011).

Desde seu lançamento, este programa tem funcionado como um mecanismo crucial na coordenação de ações de resposta a desastres naturais por meio do fornecimento de imagens de satélite (VOIGT et al., 2007). Desde sua criação até março de 2011, foram realizadas mais de 280 ativações deste programa para a aquisição de imagens de sensores ópticos e SAR. Atualmente diversas agências espaciais são membros deste programa (Tabela 2.2). O Brasil passou a integrar este programa a partir de 2010, por meio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Tabela 2.2 – Agências membros do *International Charter* e seus respectivos satélites.

AGÊNCIA	SATÉLITE
European Space Agency (ESA)	ERS, ENVISAT
Centre national d'études spatiales (CNES)	SPOT
Canadian Space Agency (CSA)	RADARSAT
Indian Space Research Organisation (ISRO)	IRS
Argentina's Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)	SAC-C
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	ALOS
United States Geological Survey (USGS)	Landsat
Digital Globe	Quickbird
GeoEye	GeoEye-1
BNSC/Surrey Satellite Technology Limited (UK)	UK-DMC
BNSC/Qinetiq (UK)	TopSat
China National Space Administration (CNSA)	FY, SJ, ZY satellite
German Aerospace Center (DLR)	TBC, TerraSAR-X

Fonte: The International Charter (2011).

### **2.3. Processos fluviais**

A bacia hidrográfica, ou de drenagem, corresponde a uma área que é drenada por um rio principal e seu sistema fluvial (tributários), com escoamento para um único ponto de saída. A quantidade de água que é dirigida para os cursos de água de uma bacia depende de diversos processos fluviais como, por exemplo, tamanho da bacia, precipitação, infiltração e a evapotranspiração (CHRISTOFOLETI, 1980).

O regime hidrológico de uma bacia pode descrever as mudanças temporais do volume de água que escoam sobre um dado canal de drenagem, que por sua vez, depende da interação de muitas variáveis como clima, geologia, tipo de relevo, uso e cobertura do solo, entre outros. Em bacias de drenagens ocorrem processos de escoamento superficiais, também conhecidos como escoamento de vertente. Este escoamento é produzido quando a taxa de precipitação excede a taxa de infiltração e evaporação, quando ocorre a saturação do solo ou o nível do lençol freático se encontra muito próximo à superfície (NOVO, 2008b).

Diversas são as formas de relevo derivadas de processos fluviais como a erosão, transporte e deposição de sedimentos. A erosão fluvial pode ser realizada por meio da corrosão (intemperismo químico entre a água e as rochas), corrasão (atrito mecânico, ou intemperismo físico) e a abrasão (ação mecânica da água que remove as camadas intemperizadas). Os sedimentos por sua vez podem ser carregados por meio de solução, suspensão ou saltação (CHRISTOFOLETI, 1980). A deposição da carga transportada pelos rios ocorre quando há diminuição da competência ou da capacidade do canal. Esta diminuição pode ser oriunda da redução da declividade ou redução do volume. Entre as formas de relevo originadas pela deposição fluvial é destacada a seguir a planície de inundação.

A planície de inundação (Figura 2.5), conhecida também como várzea, é a faixa do vale fluvial composta por sedimentos aluviais e materiais variados depositados dentro ou próximo dos canais fluviais, sendo áreas periodicamente inundadas (CHRISTOFOLETI,

1980). O escoamento sobre essas áreas ocorre principalmente ao longo dos canais de drenagem. Com eventos de cheias ou inundações, e com isso a elevação dos níveis de água, o escoamento ultrapassa os canais transbordando para áreas baixas marginais.

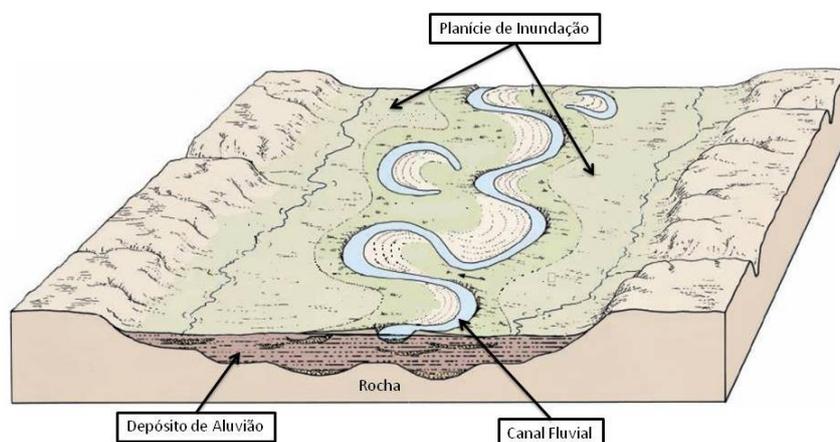


Figura 2.6 – Representação de uma planície de inundação.

Fonte: Adaptado de Earth's Dynamic Systems (2010).

Em eventos de inundações, grande quantidade de sedimentos e de águas é direcionada para as bacias de inundação. Segundo Christofoleti (1980), uma bacia de inundação corresponde às áreas mais baixas de uma planície, pobremente drenada, plana, localizadas nas proximidades de faixas aluviais de canais meândricos.

### 2.3.1. Mapeamento de inundações em imagens SAR

Segundo Castro (2003), inundações (*floods*) podem ser definidas como um transbordamento do nível da água de rios, lagos ou açudes. Em função da evolução temporal são classificadas como inundações graduais ou inundações bruscas (*flash floods*). As inundações graduais, ou periódicas, ocorrem quando o nível d'água se eleva de forma lenta e previsível, seguindo intervalos regulares. Inundações bruscas são oriundas de chuvas intensas e concentradas, ocorrendo elevação rápida do nível d'água.

Corpos d'água como canais de drenagens, áreas úmidas, áreas inundadas e lagos, são destacados em imagens SAR, devido ao elevado contraste entre superfícies d'água e áreas emersas. Muitos estudos têm demonstrado que sensores SAR oferecem melhores resultados para detectar inundações quando comparados com sensores ópticos (HESS e MELACK, 1994; TOWNSEND e WALSH, 1998; TRALLI et al., 2005).

No Brasil, estudos sobre áreas inundadas utilizando imagens SAR foram desenvolvidos ao longo da planície de inundação da Bacia Amazônica. Estes trabalhos demonstraram que o retroespalhamento SAR pode ser utilizado para discriminar estágios de inundações sob a floresta (HESS et al., 1995; MARTINEZ e TOAN, 2007) e estimar parâmetros biofísicos de vegetação aquática (NOVO et al., 1998; COSTA et al., 2002).

Diversas são as técnicas de processamento digital de imagens que podem ser aplicadas para a extração de áreas inundadas e outros corpos d'água em imagens SAR. De modo geral, são obtidos como produto final mapas mostrando área inundada e não inundada.

A limiarização (*threshold*) do histograma é a técnica mais utilizada para gerar um mapa de área inundada e não inundada, sendo utilizada em diversos trabalhos como em Anh e Dinh (2009); Chen et al., (1999); Henderson, (1995); Henry et al., (2006); Martinis et al., (2009) e em Zhou et al.,( 2000). Esta técnica consiste em separar dois grupos de níveis de cinza em uma imagem através de definição de um valor de corte do histograma. O principal complicador desta técnica é definir qual é o valor do limiar a ser utilizado, sendo muitas vezes um critério visual.

Entre os diversos tipos de classificação supervisionada com imagens SAR para extração de áreas inundadas, tem-se exemplos de aplicações por meio do método de paralelepípedo (Bonn e Dixon, 2005), árvore de decisão (Parmuchi et al., 2002) e classificação por máxima verossimilhança ( Chubey e Hathout, 2004; Kato e Yamazaki, 2009; e Song et al., 2007).

Classificação não supervisionada foi empregada por Hess et al., (2003) na identificação de corpos d'água e áreas alagadas com imagens SAR na Amazônia. Em França et al., (2007), foi utilizado o uso do ISOSEG para extrair informações morfológicas de lagos na planície Amazônica utilizando a fusão de imagens de sensores ópticos e SAR. Recentemente Pulvirenti et al., (2011) demonstraram o uso da classificação por k-médias, em imagens SAR multitemporais e de alta resolução espacial, para o monitoramento de áreas inundadas.

A técnica de detecção de mudanças pode ser aplicada quando se dispõem de imagens SAR de um mesmo sensor obtidas antes, durante ou depois da inundação (BADJI e DAUTREBANDE, 1997; NICO et al., 2000; TOWNSEND e WALSH, 1998). Através desta técnica é possível isolar áreas de menor resposta no retroespalhamento e com isso identificar áreas inundadas.

Muito destes trabalhos citados anteriormente foram desenvolvidos em áreas inundadas sobre relevo plano, sem influência de sombra de vertentes ocasionada pela geometria de imageamento SAR. A utilização de imagens SAR em região de relevo acidentado pode ter seu uso limitado para identificação de corpos d'água, devido à semelhança de retroespalhamento destes alvos com áreas de sombras de vertentes.

Alguns métodos visando reduzir erros na extração de áreas inundadas em relevo montanhoso foram desenvolvidos. Song et al., (2007) realizaram combinações entre imagem SAR e informações do terreno para extrair inundação em áreas montanhosas da península da Coreia. Foram avaliadas classificações entre a imagem SAR com medidas de textura (média, variância e contraste), modelo digital de elevação (DEM) e declividade. Os melhores desempenhos foram observados quando foram combinadas a imagem SAR, informações de elevação e declividade, obtendo acurácia total acima de 99%.

#### **2.4. Dinâmica de vertentes**

As vertentes, conhecidas também como encostas, são superfícies inclinadas, formadas por uma ampla diversidade de condições internas e externas. Este tipo de superfície possui grande importância, pelo fato de que representam a conexão dinâmica entre o divisor de água e o fundo de vale (FLORENZANO, 2008). Estas formas de relevo podem ser resultados de atividade tectônica e processos modeladores do relevo como, por exemplo, processos erosivos e/ou extrusão de lava e/ou de eventos de glaciação.

Diversos são os atributos naturais que caracterizam as vertentes, como por exemplo, a forma, comprimento e declividade, com mudanças em escala local e regional. Estas variações estão relacionadas principalmente a processos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e climáticos (GUERRA, 2007). A descrição de uma vertente fornece informações básicas para sua caracterização por meio de visualização em perfil ou em área.

O comprimento de uma vertente corresponde à medida entre o topo e a base (ou fundo do vale). O formato da vertente quando observada em perfil pode ter aparência convexa, quando o perfil desta não apresenta diminuição dos ângulos de inclinação em direção à jusante. Vertente côncava consiste de um perfil sobre uma vertente no qual ocorre o aumento dos ângulos de inclinação em direção à jusante. Outras formas são a retilínea, quando não ocorre aumento e nem diminuição dos ângulos de inclinação; e a combinação entre as formas côncava e convexa (Figura 2.6).

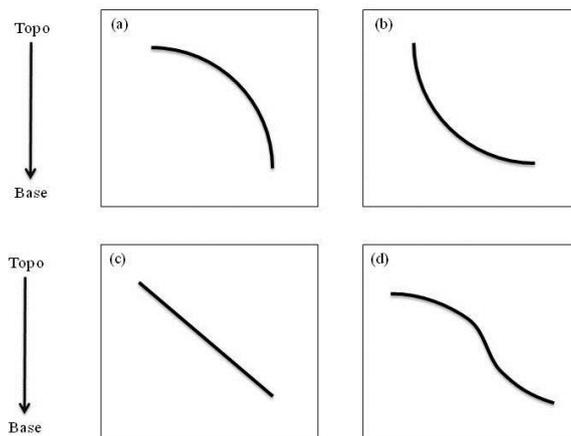


Figura 2.7 – Tipos de vertentes visualizadas por meio de perfil. (a) convexa, (b) côncava, (c) retilínea, (d) convexa-côncava.

Na dinâmica da paisagem de uma vertente, as ações que ocorrem sobre este ambiente muitas vezes resultam em mudanças intensas na geomorfologia local. Isto acontece em função da interação entre os fatores climáticos e dos aspectos característicos das encostas, como por exemplo, topografia, geologia, grau de intemperismo, solo e tipo de ocupação (CUNHA e GUERRA, 2010).

Processos exógenos como a meteorização, movimentos de massas, transporte e deposição, atuam na redução da paisagem de vertentes (CHRISTOFOLETI, 1980). Os movimentos de massas correspondem a uns dos fenômenos mais intensos na dinâmica de uma vertente. O tópico a seguir aborda algumas definições e características deste fenômeno.

#### **2.4.1. Movimentos de massa**

Os movimentos de massa são processos geodinâmicos que atuam na evolução do relevo, originam-se pela ação da gravidade e envolvem o desprendimento, o transporte e a deposição de solo ou material rochoso em áreas baixas de terrenos inclinados (BRASIL e IPT, 2007).

Os principais fatores que determinam a ocorrência de movimentos de massa são: litologia, estrutura geológica, perfil de alteração, declividade, orientação e formas das vertentes, intensidade da chuva, cobertura vegetal e ação antrópica. Uma das principais características dos movimentos de massa é a forma rápida com que ocorrem e a superfície de ruptura nitidamente definida por limites laterais e profundos (GUIMARÃES et al., 2008). Devido à ausência de mapas temáticos (geologia, solos, geomorfologia, etc.) em escala de detalhe, não foram investigados neste trabalho os fatores que determinam a ocorrência de deslizamentos de terra sobre a área em estudo.

Os movimentos de massa são caracterizados por diferenças quanto à velocidade, direção, composição do material, geometria e conteúdo de água presente na vertente. Entre os diversos tipos de movimentos de massa destacam-se os deslizamentos de terra, quedas de blocos, subsidências do solo e os fluxos de detritos ou corridas de massa. Os deslizamentos, também conhecido como escorregamentos de terra, são movimentos de velocidade média ou alta, de curto período de duração e com grande poder destrutivo.

Segundo Faria et al., (2009), os principais movimentos de massa observados na vistoria realizada após os desastres naturais de Santa Catarina em 2008, podem ser classificados como escorregamentos rotacionais, translacionais, corridas de massa e escorregamentos complexos.

Os escorregamentos de terra apresentam um plano de ruptura definido, correspondendo a uma separação entre área movimentada e não movimentada. Os escorregamentos rotacionais (Figura 2.7a) ocorrem em superfícies côncavas, associados muitas vezes à existência de solos espessos e homogêneos de textura predominantemente argilosa e em rochas sedimentares ou cristalinas, com presença de fraturas.

Os escorregamentos translacionais (Figura 2.7b) são movimentos com plano de ruptura abrupta, planar, bem definido e de curta duração. Caracterizam-se por serem rasos e de maior extensão no comprimento, estão muitas vezes associados a períodos de chuva intensa ou de longa duração, e com processo acentuado de saturação do solo. São os mais comuns entre os tipos de escorregamentos.

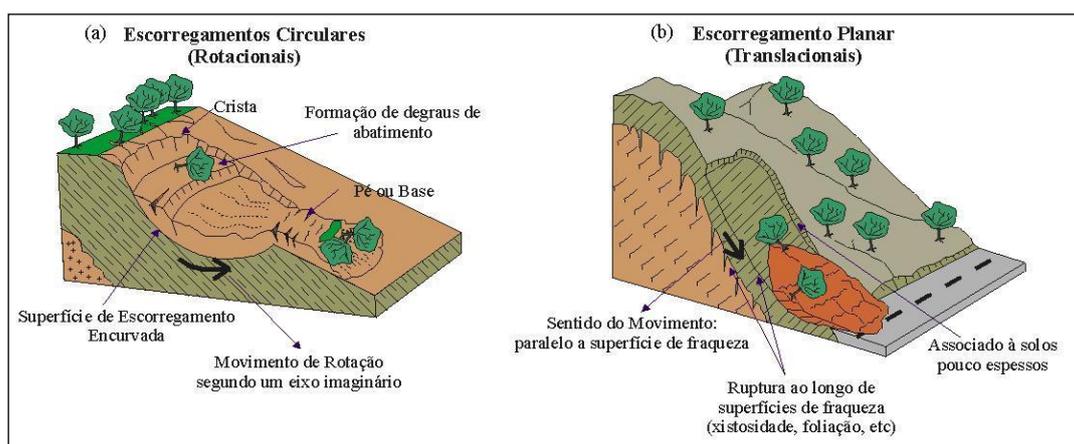


Figura 2.8 – Representação dos tipos de escorregamento rotacional (a) e translacional (b).

Fonte: IGCE, 2010.

As corridas de massa, ou detriticas (Figura 2.8a), é um tipo de movimento de massa que tem como principal característica um escoamento hidrodinâmico devido ao excesso de água no material. A corrida de massa pode ocorrer em relevo de menor declividade, dependendo das características de resistência do material. Estes tipos de movimento de massa incorporam partes de rochas, árvores e outros detritos, os quais aumentam seu potencial destruidor.

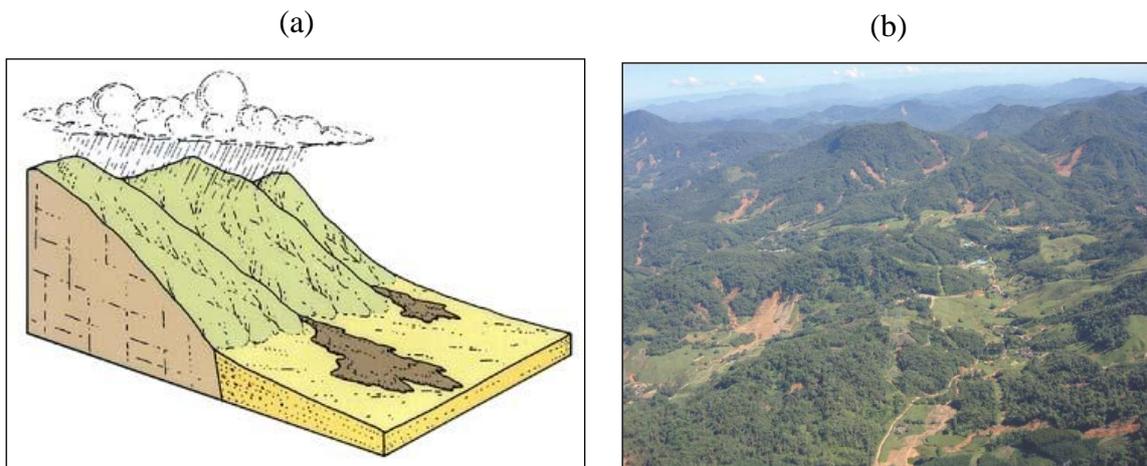


Figura 2.9 – Representação corridas de massa ou detríticas (a). Escorregamentos complexos observados na região do Morro do Baú-SC (b).

Fonte: Faria et al., (2009).

Escorregamentos complexos (Figura 2.8b) ocorrem quando dois ou mais tipos de movimentos de massa acontecem de forma simultânea ou em sequência. De acordo com Faria et al., (2009), durante as observações de dezembro de 2008 em Santa Catarina, foi constatado que alguns escorregamentos se iniciaram como rotacionais, passando para translacionais e terminando em corridas detríticas.

#### **2.4.1.1. Detecção de deslizamentos de terra com imagens SAR**

Atualmente, dispõe-se de diversos métodos e técnicas para o mapeamento de cicatrizes de deslizamentos utilizando imagens de sensores ópticos e SAR. A identificação deste tipo de alvo com uso de imagens ópticas pode ser realizada pelo emprego da estereoscopia, análise de dados LIDAR e comparação multitemporal (detecção de mudanças) de imagens ou de DEMs (MANTOVANI et al.,1996). Trabalhos anteriores demonstram a identificação de cicatrizes de deslizamentos sobre imagens SAR por meio de estereoscopia SAR (CHOROWICZ et al., 1998), integração com imagens ópticas (SINGHROY et al., 1998), análise de textura (SINGHROY e MOLCH, 2004), e interferometria SAR (ROESSNER et al., 2005).

Até o final da década de 1990, a interpretação visual e estereoscópica era a técnica com maior aplicação na identificação e monitoramento de deslizamentos (METTERNICHT et al., 2005). O advento de novos sensores SAR, com alta resolução espacial, e o desenvolvimento de novas técnicas e abordagens, como a interferometria SAR (InSAR), possibilitaram estudos mais detalhados dos diversos tipos de deslocamentos da superfície terrestre.

Singhroy e Molch (2004) chamam atenção para duas diferentes abordagens que podem ser adotadas em estudos de deslizamentos a partir de imagens de sensoriamento remoto. A primeira abordagem refere-se às características qualitativas como distribuição, tipos e números de eventos, que podem ser obtidos através de interpretação visual de imagens de alta resolução. A segunda abordagem sugerida por estes autores é complementar à primeira, e é baseada na quantificação da área afetada por deslizamentos por meio da técnica de visão estereoscópica e InSAR.

InSAR é a técnica de monitoramento de deslocamentos do relevo mais pesquisada a partir da década de 1990 (METTERNICHT et al., 2005). A InSAR é baseada principalmente na informação de fase, contida em duas ou mais cenas de um mesmo local, adquiridas por um mesmo sensor com antenas em diferentes posições ou em diferentes tempos de aquisição. Assim, diferenças mínimas na fase da onda podem ser associadas a mudanças na topografia ou superfície do local, obtendo precisão milimétrica (da ordem de frações do comprimento de onda do sensor).

Apesar de a InSAR produzir observações sobre o deslocamento da superfície com grande precisão, algumas restrições (perturbações atmosféricas e problemas de correlação temporal) podem limitar seu uso para o monitoramento de movimentos de massa (KLEES e MASSONNET, 1999). Neste sentido, melhores informações sobre movimentos de massa utilizando InSAR podem ser obtidas para movimentos extremamente lentos, com velocidade menor do que poucos centímetros por mês (METTERNICHT et al., 2005).

Muitos casos de desastres naturais que envolvem movimentos de massas, ocorrem em locais onde não se dispõem de dados InSAR, e devido a presença de chuva e intensa cobertura de nuvens, muitas vezes não há possibilidade de obtenção de imagens ópticas de alta resolução espacial, orbitais ou aerotransportadas. Nestes casos, imagens SAR em amplitude possuem grande utilidade na avaliação de áreas afetadas por deslizamentos.

Um dos primeiros trabalhos neste sentido foi desenvolvido por Singhroy (1995). Através de realces sobre imagem SAR e fusão com imagem TM5/LANDSAT, foi possível identificar e caracterizar deslizamentos, utilizando a interpretação visual de parâmetros como forma, orientação, cor, brilho e informações auxiliares (geologia e geomorfologia).

O advento de novos sistemas sensores SAR de alta resolução espacial (RADARSAT-2, TerraSAR-X e COSMO-SkyMed) têm possibilitado um contínuo acompanhamento de áreas de interesse independente das condições meteorológicas e de iluminação solar (dia ou noite).

Um dos primeiros exemplos da utilização de imagens SAR orbitais de alta resolução espacial pode ser visto no trabalho de Singhroy e Molch (2004), que utilizaram imagem RADARSAT-1 (modo Fine) para investigar a distribuição de deslizamentos associando a três tipos de textura de detritos oriundos de deslizamentos (fina, média e grossa).

Liao et al., (2009) discutem aspectos que devem ser considerados para a utilização de imagens SAR de alta resolução espacial em relevo montanhoso. Segundo esses autores, deslizamentos de terra podem ser diretamente e indiretamente detectados em imagens SAR por meio de suas cicatrizes e ocorrência de danos em infraestruturas, estradas e canais de drenagens.

Suzuki et al., (2008) utilizaram imagens TerraSAR-X para avaliar situações de emergências, como os deslizamentos ocasionados por terremotos na província de

Sichuan (China). Estes autores demonstram a possibilidade de identificação de áreas afetadas por meio de uma única imagem, associando deslizamentos de terra a lagos e rios represados.

No terremoto em Wenchuan, em 2008 na China, dados SAR oriundos de diversas fontes foram utilizados para a identificação de estradas bloqueadas, lagos represados, pontes e prédios destruídos. Guo et al., (2010) apresentam um exemplo do uso de dados InSAR para a interpretação da deformação regional ocasionada pelo terremoto. Imagens ópticas e SAR, de sensor aerotransportado, também foram utilizadas neste trabalho para uma análise mais pontual. Sobre esta mesma região (Wenchuan), Balz e Liao (2010) utilizaram imagens SAR de alta resolução espacial, adquiridas após o terremoto de 2008, para detectar construções destruídas ou parcialmente destruídas.

## **2.5. Sistemas SAR orbitais**

### **2.5.1. O sensor PALSAR (satélite ALOS)**

O satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) é um sistema de observação da terra que possui sensores de imageamento na região do espectro óptico (PRISM e AVNIR-2) e de micro-ondas (PALSAR). Este satélite foi desenvolvido pela Agência Japonesa de Exploração do Espaço (*Japanese Space Exploration Agency's - JAXA*) e foi lançado em 24 de Janeiro de 2006. Possui órbita hélio-síncrona, altitude de 691 km e período de revisita de 46 dias.

O PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) é um sensor SAR que opera com banda L (1,2 GHz) e apresenta avanços em relação ao satélite JERS, também desenvolvido pela JAXA. Este sensor possui quatro modos de aquisição de imagens: *Fine Beam Single polarization (FBS)*, *Fine Beam Dual polarization (FBD)*, *Polarimetric mode (POL)* e *ScanSAR mode (SC)* (Figura 2.9 e Tabela 2.3).

O principal objetivo da missão ALOS é o monitoramento de forma sistemática do meio ambiente em escala global. Outra característica importante deste projeto é prioridade

para atendimento em situações de emergência como terremotos e inundações (ROSENQVIST et al., 2007).

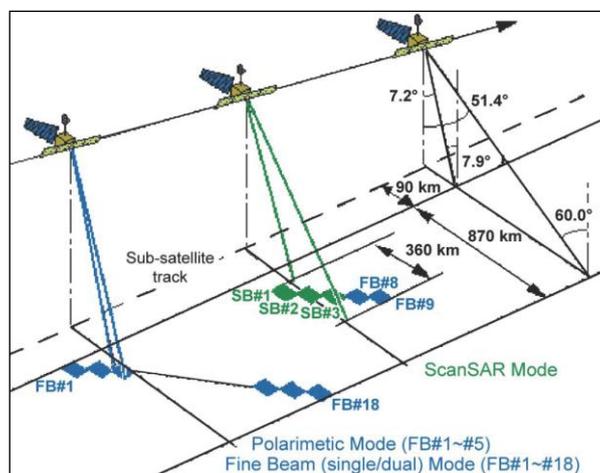


Figura 2.10 – Modos de operação PALSAR

Fonte: Rosenqvist et al., (2007).

Tabela 2.3 – Detalhes sobre os modos de operação PALSAR.

Modo	Fine		ScanSAR	Polarimétrico
Chirp Bandwidth	28 MHz	14 MHz	14 MHz, 28 MHz	14 MHz
Polarização	HH ou VV	HH + HV ou VV+VH	HH ou VV	HH+HV+VH+VV
Ângulo de incidência	8°- 60°	8°- 60°	18°- 43°	8°- 60°
Resolução Espacial nominal	10 m	20 m	100 m	25
Faixa imageada	40 - 70 km	40 - 70 km	250 - 350 km	20 - 65 km

Fonte: JAXA (2011).

### 2.5.2. O sensor ASAR (satélite ENVISAT)

O satélite ENVISAT (*Environmental Satellite*) foi lançado no dia 21 março de 2002, pela Agência Espacial Europeia (ESA) e também possui vários sensores de imageamento em diferentes regiões do espectro eletromagnético (visível, infravermelho e micro-ondas). Opera em órbita hélio-síncrona, altitude de 800 km com período de revisita de 35 dias.

O sensor ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) opera na banda C (5,3 GHz) e foi desenvolvido a partir dos avanços do instrumento AMI/SAR dos satélites ERS-1/2 para dar continuidade a estes sistemas de observação da terra. O sensor ASAR pode obter

imagens através de cinco diferentes modos, que variam quanto à polarização, resolução espacial e faixa de imageamento (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Modos de imageamento do sensor ASAR.

Modo	Resolução Espacial	Faixa Imageada	Polarização
Image Mode Precision (IMP)	30 m	56 a 100 × 100 (km)	VV ou HH
Alternating Polarization Mode (AP)	30 m	56 a 100 × 100 (km)	VV ou HH, VV/HH
Wide Swath Mode (WS)	150 m	400 × 400 (km)	VV ou HH
Global Monitoring Mode (GM)	1000 m	400 × 400 (km)	VV ou HH
Wave Mode (WM)	9 m	5 x5 (km)	VV ou HH

Fonte: ESA e MDA (2010).

### 2.5.3. O satélite RADARSAT-2

O RADARSAT-2 foi desenvolvido através da parceria entre a Agência Espacial Canadense (*Canadian Space Agency*) e a empresa MacDonald Dettwiler and Associates Ltd. (MDA) para dar continuidade às demandas comerciais e científicas do RADARSAT-1. O lançamento deste satélite ocorreu em 14 de Dezembro de 2007, operando em órbita hélio-síncrona, com altitude de 798 km e período de revisita de 24 dias.

O novo SAR canadense opera na banda C (5,4 GHz) e apresenta avanços em relação ao RADARSAT-1, principalmente pela possibilidade de coletar imagens multipolarizadas e polarimétricas, pela versatilidade de variação de azimute de visada (à direita e à esquerda do traçado da órbita), e com resolução espacial mais fina (até aproximadamente 1 metro). De todos os sistemas SAR orbitais disponíveis na atualidade, o RADARSAT-2 possui a maior diversidade quanto aos modos de coleta das imagens (Figura 2.10 e Tabela 2.5).

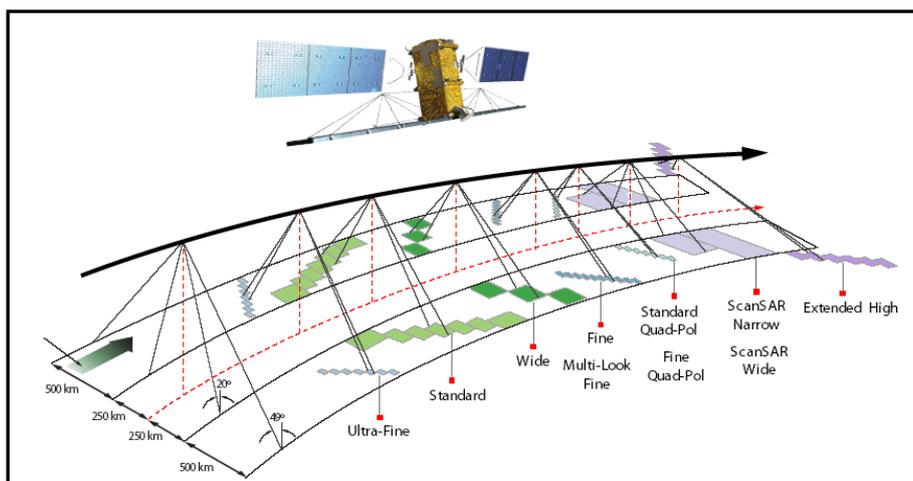


Figura 2.11 – Modos de imageamento RADARSAT 2.

Fonte: MDA (2009).

Tabela 2.5 – Detalhes sobre os modos de operação RADARSAT-2.

Modo	Faixa imageada	Resolução Espacial (Rg. x Az.)	Ângulo de incidência	Polarização
Spotlight	18 x 8 km	1,6 – 2,4 x 0,8 m	20° – 49°	Single Polarization (HH ou VV ou HV ou VH)
Ultra-Fine	20 km	3 x 3 m	30° – 49°	
Multi-Look Fine	50 km	8 x 8 m	30° – 50°	
Fine	50 km	8 x 8 m	30° – 50°	Single Polarization ou Dual Polarization (HH + HV) (VV + VH)
Standard	100 km	25 x 26 m	20° – 49°	
Wide	150 km	30 x 26 m	20° – 45°	
ScanSAR Narrow	300 km	50 x 50 m	20° – 46°	
ScanSAR Wide	500 km	100 x 100 m	20° – 49°	Single Polarization (HH)
Extendend High	75 km	18 x 26 m	49° – 60°	
Fine Quad-Pol	25 km	12 x 8 m	20° – 41°	Quad Polarization (HH + VV + HV + VH)
Standard Quad-Pol	25 km	12 x 8 m	20° – 41°	

Fonte: MDA (2009).

#### 2.5.4. O satélite TerraSAR-X

O satélite TerraSAR-X é resultado de uma parceria público-privada entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR), que faz a distribuição para uso científico, e a EADS Astrium, que realiza a comercialização através de sua empresa, a InfoTerra GmbH. O TerraSAR-X foi lançado em 15 de Junho de 2007, tem órbita hélio-síncrona, altitude de

514 km e período de revisita de onze dias. O TerraSAR-X opera em banda X (9,6 GHz), possui quatro modos de aquisição de imagens (Tabela 2.6 e Figura 2.11).

Tabela 2.6 – Detalhes sobre os modos de operação TerraSAR-X.

Modo	Polarização	Faixa imageada	Resolução Espacial (Range)	Resolução Espacial (azimute)	Ângulo de incidência
SpotLight (SL)	Simples*	10 km	1,48 a 3,49 m	1,7 m	20°- 55°
	Dupla**			3,4 m	
High Resolution SpotLight (HS)	Simples*	5 km x 10 km	1,48 a 3,49 m	1,1 m	20°- 55°
	Dupla**			2,2 m	
StripMap (SM)	Simples*	30 km	1,70 a 3,49 m	3,3 m	20°- 45°
	Dupla***	15 km		6,6 m	
ScanSAR (SC):	Simples*	100 km	1,70 a 3,49 m	18,5 m	20°- 45

\* HH ou VV. \*\* HH/VV. \*\*\* HH/VV, HH/HV ou VV/VH.

Fonte: InfoTerra, 2010

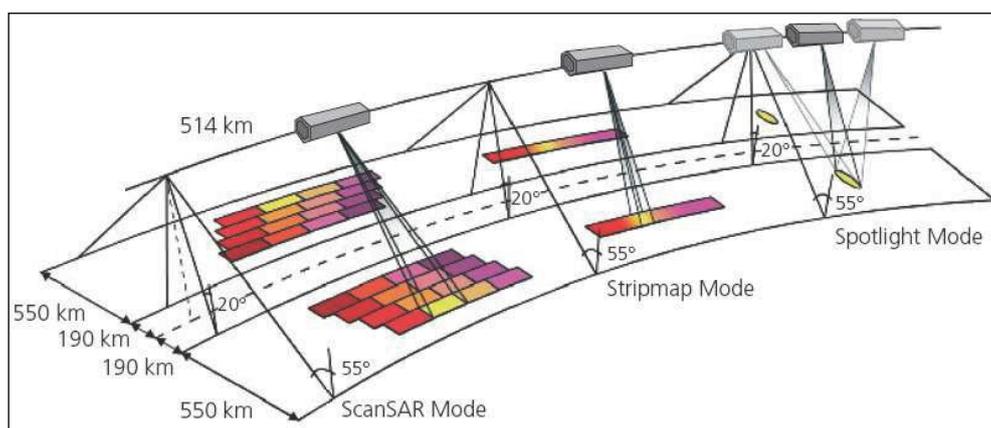


Figura 2.11 – Modos de imageamento TerraSAR-X. (Fonte: InfoTerra, 2010)

Assim como o RADARSAT-1 e 2, este programa foi desenvolvido principalmente para uso comercial de imagens SAR. Entre as aplicações, tem-se a utilização de imagens para mapeamento topográfico, uso e cobertura do solo, geração de DEM de alta resolução espacial, análise de desastres naturais, entre outras aplicações (HERRMANN e BOTTERO, 2007).



### 3. ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. Localização das áreas-testes

Devido à extensão das cenas SAR adquiridas, disponibilidade de dados de campo e de informações temáticas, três áreas de estudo, apresentadas na Figura 3.1, foram definidas para este trabalho.

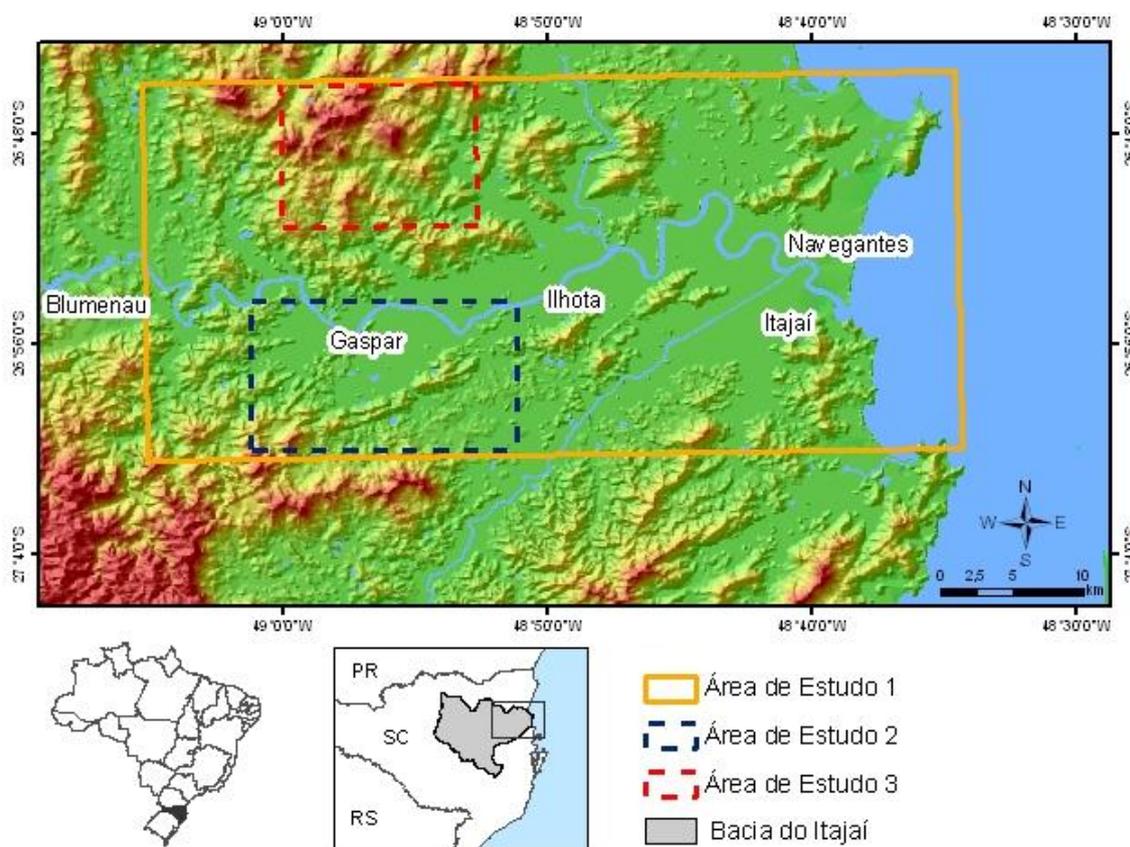


Figura 3.1 – Localização das áreas de estudo.

Para o mapeamento multissensor da inundação, foi selecionada a planície do médio e baixo curso do rio Itajaí-açu, localizadas entre as cidades de Blumenau e Itajaí (Área de Estudo 1).

A análise multitemporal da inundação foi realizada sobre a região situada entre o Ribeirão Gaspar Grande e o Ribeirão Poço Grande, localizada próximo à cidade de

Gaspar (Área de Estudo 2). Esta região foi selecionada por corresponder à área de maior sobreposição das cenas SAR disponível para este trabalho.

A área de estudo três corresponde à região do morro do Baú, uma das regiões mais afetadas por movimentos de massa durante o evento de 2008. Devido à resolução espacial e período de obtenção das imagens, foram analisadas as inundações e deslizamentos de terra ocorridos sobre áreas rurais.

### **3.2. Clima**

O clima da região de estudo é definido como subtropical caracterizado por um verão úmido e quente, com grande incidência de chuvas por todo o Vale. A temperatura média anual varia entre 16°C e 20°C. A precipitação média anual é da ordem de 1980 mm com duas épocas chuvosas, uma no verão (dezembro a março) e outra mais reduzida na primavera (setembro e outubro). A umidade relativa do ar é considerada alta, com média mensal superiores a 80% ao longo do ano devido à forte influência dos ventos marítimos (SILVA e SEVERO, 2003). Estas características climáticas da região são fortemente influenciadas pela posição geográfica do Vale do Itajaí, voltado para leste, o que favorece a entrada de ventos úmidos, oriundos do oceano Atlântico.

### **3.3. Hidrografia**

O Vale do Itajaí pertence a maior bacia hidrográfica do Estado de Santa Catarina, a bacia do rio Itajaí, com 15.000 km<sup>2</sup> e faz parte do sistema de drenagem da Vertente Atlântica. O rio Itajaí-açu é o maior curso d'água desta bacia, sendo formado pelo encontro de dois rios, o Itajaí do Sul e o Itajaí do Oeste. Como principais afluentes têm-se o rio Itajaí do Norte em Ibirama, o rio Benedito em Indaial, o rio Luis Alves em Ilhota, e o rio Itajaí Mirim, já no baixo curso, no município de Itajaí. A Bacia do Itajaí possui como limites geográficos a Serra Geral e a Serra dos Espigões a Oeste, ao Sul o complexo de Serras da Boa Vista, Faxinais e Tijucas do Sul, e as Serras da Moema e do Jaguará ao Norte. Para a bacia do Itajaí os menores valores de vazão média mensal

ocorrem no mês de abril ( $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) enquanto que os maiores valores de vazão média mensal ocorrem no mês outubro ( $156 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Segundo Pinheiro (2003) a vazão média mensal do rio Itajaí-açu observada na seção fluviométrica de Blumenau é de  $372 \text{ m}^3/\text{s}$ .

O rio Itajaí-açu e alguns de seus tributários como, por exemplo, o rio Luis Alves e Itajaí Mirim possuem trechos ao longo de seu canal na forma de meandro. Os cursos d'água desta bacia possuem um perfil longitudinal de elevada declividade nas nascentes e de baixa declividade no baixo curso, já nas áreas de planícies. Segundo Aumond et al., (2009), do centro urbano de Blumenau até sua foz, no município de Itajaí, a declividade do rio Itajaí-açu é de  $0,013 \text{ (m/km)}$ , muito baixa em relação à região mais a montante, no município Rio do Sul ( $5,21 \text{ m/km}$ ). Esta baixa declividade no médio e baixo curso do rio Itajaí torna esta região muito propícia à ocorrência de inundações.

### **3.4. Geologia**

Geologicamente, a área em estudo localiza-se sobre unidades tectônicas antigas (Neoproterozóico) como a Micro Placa Luis Alves, o Cinturão Dom Feliciano, Bacias Vulcanossedimentares e sobre unidades tectônicas mais recentes (Cenozóico), como as Coberturas Quaternárias, conforme apresentado na Figura 3.2.

A Micro Placa Luis Alves é composta predominantemente por gnaisses granulíticos, com seus limites relacionados a falhas de empurrão e orientação do bandamento na direção NW. O Cinturão Dom Feliciano é constituído de rochas graníticas multi-intrusivas e polifásicas, formado por rochas deformadas, como granito-gnáissicas e granitóides porfíricos, constituindo de múltiplos eventos magmáticos de colocação meso a epizonal. As sequências vulcanossedimentares correspondem a bacias que intercalam rochas sedimentares, vulcânicas ácidas a intermediária e vulcanoclásticas em porções variadas (SIGA JUNIOR et al., 1993).

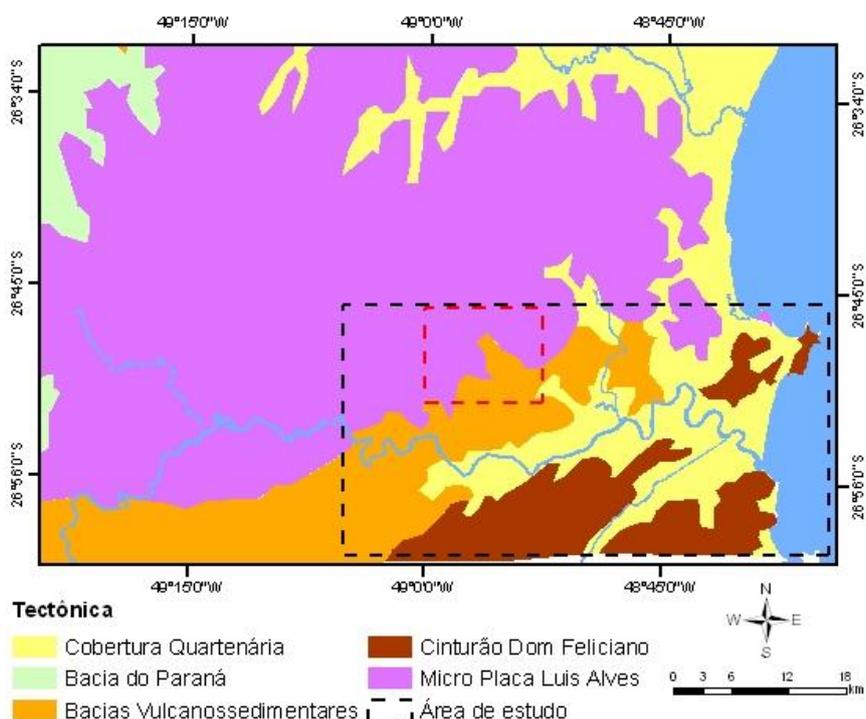


Figura 3.2 – Unidades tectônicas da Área de Estudo. Polígono tracejado vermelho corresponde ao complexo do Baú. Fonte: CPRM (2010).

Conforme Aumond (2003), a evolução geológica da Bacia do Itajaí está relacionada a eventos tectônicos da deriva continental, que originaram diversas estruturas rúpteis e dúcteis com predomínio nas direções noroeste e nordeste. O soergimento da Serra do Mar durante o Cretáceo e o Terciário provocou o basculamento do planalto para oeste, e com isso formou o atual sistema de drenagem, com o escoamento para leste, na direção do oceano Atlântico. Alguns trechos do rio Itajaí-açu, e todo o Itajaí Mirim, estão encaixados em fraturas regionais de orientação nordeste. Já os rios Itajaí do Norte e Itajaí do Sul estão condicionados a fraturas orientadas segundo NW.

As unidades litológicas sobre a área em estudo são constituídas pelo Embasamento Catarinense (Escudo Catarinense), que é composto por rochas magmáticas e metamórficas mais antigas, de idade Arqueana, e pelos sedimentos mais recentes, do período Holoceno-Pleistoceno. Segundo CPRM (2010), a região do médio e baixo Vale do Itajaí é constituída das unidades geológicas apresentadas na Figura 3.3 e Tabela 3.1.

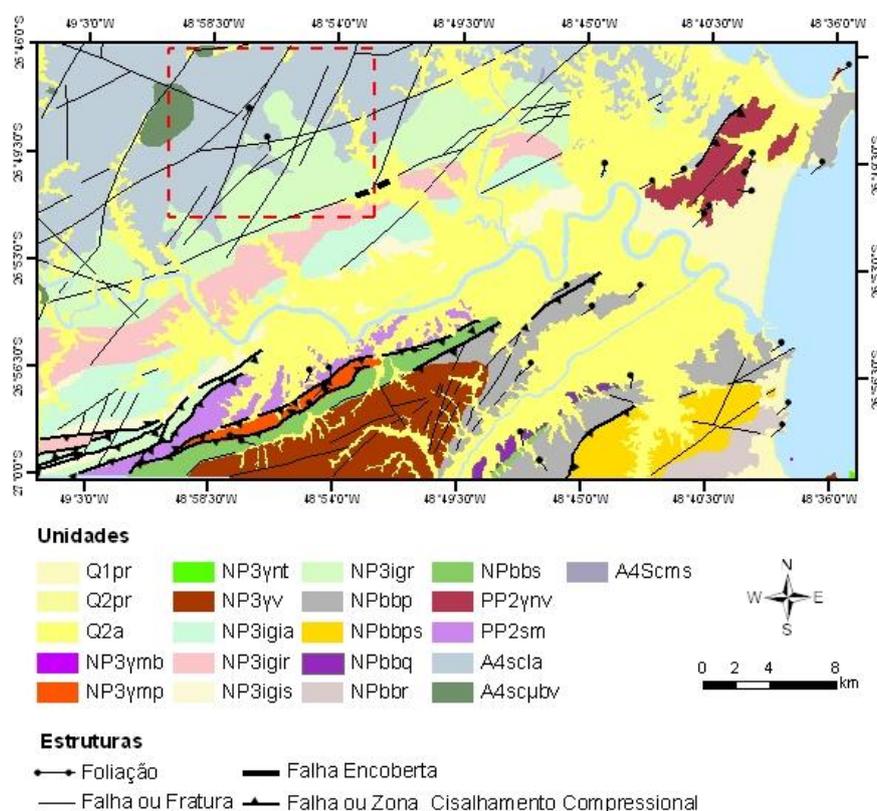


Figura 3.3 – Unidades Geológicas da Área de Estudo. Polígono tracejado vermelho corresponde ao complexo do Baú. Fonte: CPRM (2010).

Tabela 3.1 – Unidades Geológicas da área em estudo.

ERA	UNIDADE	SIGLA
Cenozóico	Depósitos Praiais Atuais	Q2pr
	Depósitos Praiais Antigos	Q1pr
	Depósitos Aluvionares	Q2a
Neoproterozóico	Formação Gaspar	NP3igr
	Granito Morro do Parapente	NP3ymb
	Litofácies arenito com conglomerado intercalado	NP3igia
	Litofácies metapelítica (p)	NPbbp
	Litofácies metapsamítica (ps)	NPbbps
	Litofácies metapsamítica rítmica (s)	NPbbs
	Litofácies metarítmica (r)	NPbbr
	Litofácies quartzítica (q)	NPbbq
	Litofácies siltito e arenito fino a médio rítmico	NP3igr
	Litofácies siltito e argilítico com conglomerados esparsos	NP3igis
Suíte Valsungana	NP3γv	
Paleoproterozóico	Augen Gnaiss Navegantes	PP2γnv
	Complexo Gnáissico-Migmatítico São Miguel	PP2sm
Neoarqueano	Gnaisses Granulíticos Luis Alves (la)	A4scla
	Unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha	A4scµbv
	Unidade Metassedimentar (ms)	A4Scms

Os Depósitos Aluvionares correspondem a areias de granulometria grossa a fina, cascalhos e sedimentos siltico-argiloso, localizados em calhas de rios e nas planícies de inundação. As unidades geológicas da região do morro do Baú (área de estudo 3) são mapeadas como Gnaisses Granulíticos Luis Alves (Ia), Unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha, Formação Gaspar e os Depósitos Aluvionares.

A unidade Gnaisses Granulíticos Luis Alves (Ia) data do Neoarqueano (2.500 Ma) e engloba um complexo de rochas que afloram nas regiões leste e nordeste da Bacia do Itajaí, composto principalmente por gnaisses enderbíticos, charnoenderbiticos e trondhjemito com enclaves máficos de gabronorito.

A Unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha, junto com a unidade Gnaisses Granulíticos Luis Alves (Ia), faz parte do Complexo Granulítico de Santa Catarina, datada do Neoarqueano (2.500 Ma). Possui como principais litologias: piroxenitos, noritos, gabronoritos, gabros e o magnetitos.

A Formação Gaspar corresponde a antigos depósitos (542 Ma) relacionados a um regime fluvial de águas agitadas, transformados ao longo do tempo geológico em meta-arenitos, constituído por sedimentos clásticos grossos de composição variada. Nesta formação encontram-se conglomerados de rochas sedimentares clásticas que podem aflorar em áreas elevadas como no Morro do Baú (AUMOND, 2003).

### **3.5. Solos**

Segundo o mapeamento de tipos de solos realizado por EMBRAPA (1998), os Gleissolos são os solos com maior expressão espacial nas áreas de planície. Desenvolvem-se sobre relevos planos, possui alto teor de argila, baixa taxa de infiltração e característica hidromórfica.

Nas áreas de relevo ondulado e forte ondulado ocorrem os Argissolos Vermelho-Amarelo, que são caracterizados por sua textura argilosa, originados de rochas ígneas intrusivas (granitos) ou metamórficas (gnaisses). Em eventos de elevada quantidade de

chuva, estes tipos de solo podem apresentar no horizonte B um alto grau de saturação, o que pode favorecer o fenômeno de solifluxão ou queda de barreiras (SANTOS e UBERTI, 2003).

Sobre as áreas com relevo montanhoso e escarpado predomina a ocorrência de solos Litólicos Álicos, que correspondem a solos com textura argilosa e com horizonte A diretamente sobre o substrato rochoso.

### **3.6. Aspectos geomorfológicos**

O relevo da região é caracterizado pela presença de serras que alcançam até 900 metros em relação ao nível do mar, com encostas muito íngremes e por áreas mais planas, representadas pelas planícies que margeiam o rio Itajaí-açu e seus principais afluentes. Muito presente nesta região são os vales estreitos em forma de “V”, com áreas planas ao longo dos cursos de água variando entre 200 a 1.500 metros de largura (AUMOND et al., 2009).

O Vale do Itajaí apresenta dois compartimentos geomorfológicos, que favorecem eventos de inundações e os diversos tipos de movimentos de massas. O primeiro compartimento trata-se da Serra do Mar e parte da Serra Geral, um sistema montanhoso que se estende pelo litoral sudeste e sul do Brasil, com embasamento em rochas graníticas cristalinas da Província Mantiqueira. Já o segundo compartimento corresponde às áreas mais baixas, que são áreas de planícies quaternárias, superfícies de relevo plano de origem flúvio-marinha, onde predominam os processos de acumulação de materiais (SILVA DIAS, 2009).

### **3.7. Cobertura vegetal e uso da terra**

A fisionomia vegetal da área em estudo compreende quatro formações da Floresta Ombrófila Densa, que se relacionam principalmente com a cota topográfica: a formação Aluvial ou Terras Baixas, nas cotas inferiores a 100 metros de altitude, a formação Submontana com ocorrência nas cotas entre 100 e 400 metros, a formação

Montana entre as cotas de 400 e 800 metros, e em alguns pontos isolados na bacia pode-se encontrar a formação Alto-montana nas cotas acima de 800 (SEVEGNANI, 2003).

Atualmente, maior parte da vegetação existente é secundária, existindo somente cerca de 7% da vegetação original. Isto evidencia a grande alteração ambiental ocasionada por exploração de madeira, cultivos agrícolas, áreas de pastagens e expansão urbana (BUNGE, 2009).

Na região do baixo vale, nas áreas mais planas entre Blumenau até Itajaí há o predomínio do uso do solo para atividades primárias com destaque para áreas de reflorestamento, arrozais e pastagens. Destacam-se também as manchas de ocupação urbana dos municípios de Blumenau, Itajaí e Navegantes. Esta região possui aproximadamente 1.500.000 habitantes distribuídos em 49 municípios, tendo sua economia voltada para a agricultura (arroz e banana), pastagem, indústria têxtil, turismo, importações e exportações no porto de Itajaí.

Grande parte da planície ao longo do Vale do Itajaí é utilizada para o cultivo de arroz irrigado. Segundo EPAGRI (2011), este tipo de cultivo em todo o estado de Santa Catarina é conduzido no sistema conhecido como pré-germinado, no qual a semeadura é efetuada sobre uma lâmina d'água, com sementes pré-germinadas. Este tipo de cultivo na região do médio e baixo Vale gera rendimentos médios de 10 a 12 t/ha por safra.

Características como terreno plano, solo argiloso com baixa permeabilidade e pouco drenado desta região favorecem o cultivo de arroz irrigado com alto rendimento. De forma geral, o cultivo de arroz irrigado é realizado sobre quadras ou diques com uma lâmina d'água de aproximadamente 8 a 10 centímetros no momento de semeadura. Após a emergência das plântulas a água permanece no dique durante todo o ciclo, até sua colheita.

O cultivo de arroz irrigado na região inicia-se nos meses de setembro e outubro, com o preparo do terreno. Após esta preparação é realizada a distribuição das sementes nos diques alagados. O ciclo finaliza com o período de colheita nos meses de fevereiro e março (BATISTA, 2004).

### **3.8. Desastres naturais no Vale do Itajaí**

A cidade de Blumenau possui os registros mais antigos do histórico de enchentes ocorridas desde o início da colonização na região, por volta de 1830. O primeiro registro data de 1850, e até o ano de 2001 ocorreram cerca de 63 enchentes, sendo as de 1852, 1880, 1911, 1983 e 1984 de maiores proporções, por ultrapassar a cota de 15 metros na cidade de Blumenau (PINHEIRO, 2003).

Três destas cinco inundações ocorridas (1852, 1880 e 1911) se deram quando a região do Vale do Itajaí ainda possuía grande parte de sua cobertura vegetal original. Refosco e Pinheiro (1999), analisando a influência da alteração da cobertura vegetal sobre o regime hídrico na sub-bacia do rio Hercílio, tributário da margem esquerda do rio Itajaí-açu, observaram que no período entre as décadas de 1960 e 1980, a vazão média nesta área sofreu um aumento de 60%. Alterações sobre canais de drenagem e no padrão de uso e cobertura do solo, ocasionados pela expansão das atividades agrícolas, industriais e minerais, têm provocado alteração e mudanças no regime hídrico. Estas alterações, em conjunto com a expansão das áreas ocupadas, têm relação direta com o aumento dos eventos de desastres naturais sobre a região.

Nos anos de 1983 e 1984 ocorreram enchentes consideradas atípicas sobre a região do Vale do Itajaí, principalmente sobre a cidade de Blumenau, quando 90% da área urbana foram afetadas, sendo exceção os bairros mais altos (FRAGA, 2009).

O desastre de 2008 é considerado resultado da chuva contínua que ocorria sobre a região desde o mês de outubro, e da intensa quantidade de precipitação concentrada em apenas dois dias, em novembro de 2008. Esta chuva intermitente durante o mês

de outubro e novembro manteve o solo saturado, resultando em uma baixa capacidade de infiltração. A precipitação dos dias 22 a 24 de novembro de 2008 foi associada a um anticiclone estacionado sobre o oceano Atlântico, o que favorecia o transporte de umidade atmosférica para a região leste de Santa Catarina (SEVERO, 2009).

O desastre de 2008 é considerado o de maior intensidade devido à ocorrência de movimentos de massas, com grandes proporções sobre áreas urbanas e rurais. Após este desastre, um grande mapeamento de áreas afetadas por movimentos de massa foi realizado por BRASIL e CEPED (2009) com o objetivo de avaliar as áreas atingidas por diferentes tipos de movimentos de massa. Neste trabalho foram vistoriadas 2.347 edificações afetadas por deslizamentos de terra em 25 municípios.

Segundo BRASIL e CEPED (2009), os movimentos de massas ocorreram em encostas naturais e desmatadas, e em taludes de corte ou aterro. Quanto à tipologia do movimento, houve predomínio do movimento do tipo deslizamentos e de fluxo de detritos. Nas áreas com ocupação rural foram observadas rupturas que movimentaram toneladas de solo em locais com e sem intervenção humana (BRASIL e CEPED, 2009).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Material

Para a realização deste trabalho foram utilizadas imagens SAR em amplitude (Tabela 4.1) e informações auxiliares como dados planimétricos e altimétricos, mapas temáticos, dados hidrológicos e levantamento de deslizamentos de terra, descritos a seguir:

Tabela 4.1 – Resumo das características gerais das imagens SAR.

	FBD PALSAR	ASAR	RADARSAT-2	TerraSAR-X	FBS PALSAR
Período	Pré-evento	Evento			Pós-evento
Data	14-set-08	27-nov-08	28-nov-08	1-dez-08	30-jan-09
	1-out-08		30-nov-08		
Hora Aquisição	23h18min 23h21min	9h39min	18h56min 5h37min	18h41min	23h21min
Nível de processamento	1.5	ASA IMP 1P	SGC	MGD	1.5
Frequência GHz (Banda)	1,27 (L)	5,3 (C)	5,4 (C)	9,6 (X)	1,27 (L)
Comprimento de onda (cm)	23,5	5,6	5,5	3,1	23,5
Polarização	HH, HV	HH	HH	HH	HH
Órbita	Ascendente	Descendente	Ascendente Descendente	Ascendente	Ascendente
Incidência média	38,9°	33,7°	39,3°	28,7°	38,9°
Resolução espacial (m) (Rg. x Az.)	10,7 x 4,5*	~30 x 30**	25 x 26	2,98 x 3,05	5,4 x 4,5*
Espaçamento Pixel (m)	12,5	12,5	12,5	3,00	6,25

\* Shimada et al., (2009) \*\* ESA (2009).

Dados auxiliares:

- Base cartográfica digital do estado de Santa Catarina (hidrografia, estradas e curvas de nível) de escala 1:50.000 (GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC, 2008);
- Modelo Digital de Elevação (DEM) elaborado a partir das curvas de nível com equidistâncias de 20 metros;

- Mapeamento do Uso do Solo e Cobertura Vegetal do Estado de Santa Catarina de escala 1:50.000 (GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC, 2008);
- Dados de precipitação da estação pluviométrica localizada na cidade de Blumenau (ANA, 2009);
- Registro fotográfico de áreas atingidas por inundação e deslizamento de terra coletados em vistorias de áreas atingidas, cedidos pelo Geólogo da UFSC, Dr. Joel Pellerin, do relatório de Vianna e Souza (2009) e de trabalho de campo.

A imagem ASAR, em órbita descendente (visada para oeste) foi cedida pelo programa “*International Charter and Major Disasters*”. Esta imagem foi adquirida no modo de imageamento *Image Mode*, com o nível de processamento IMP 1P (*Image Mode Precision*), que corresponde a um produto com correção para *ground range*, com processamento *multi-look* e calibrada radiometricamente.

As imagens RADARSAT-2 (RST-2) foram cedidas pela empresa MDA GSI (MDA Geospatial Services Inc.) correspondendo ao modo de imageamento STANDARD 5 (STD5), com órbitas opostas (visadas para leste e oeste). Foram fornecidas com nível de processamento SGF (*Path Image*), com correção para *ground range*, processada *multi-look* e com calibração radiométrica.

As imagens PALSAR foram fornecidas pela JAXA, dentro do programa ALOS AO (*ALOS Announcement of Opportunity*), a partir da proposta ALOS RA# 219: “*Geoscience Applications with L-Band PALSAR data in the Tropical Environments of Brazil*”. Foram utilizadas imagens adquiridas no modo FBD (*Fine Beam Dual polarization*) e FBS (*Fine Beam Single polarization*) com nível de processamento 1.5, que correspondem a imagens processadas com 4 *looks* e geocodificada.

A imagem TerraSAR-X (TSX) foi cedida pela empresa Infoterra GmbH, adquirida no modo de imageamento Stripmap (SM), com nível de processamento MGD (*Multi look Ground range Detected*), que corresponde a uma imagem processada com 1 *look* e

corrigida para *ground range*. A figura 4.1 apresenta a disposição das imagens SAR e suas respectivas abrangências.

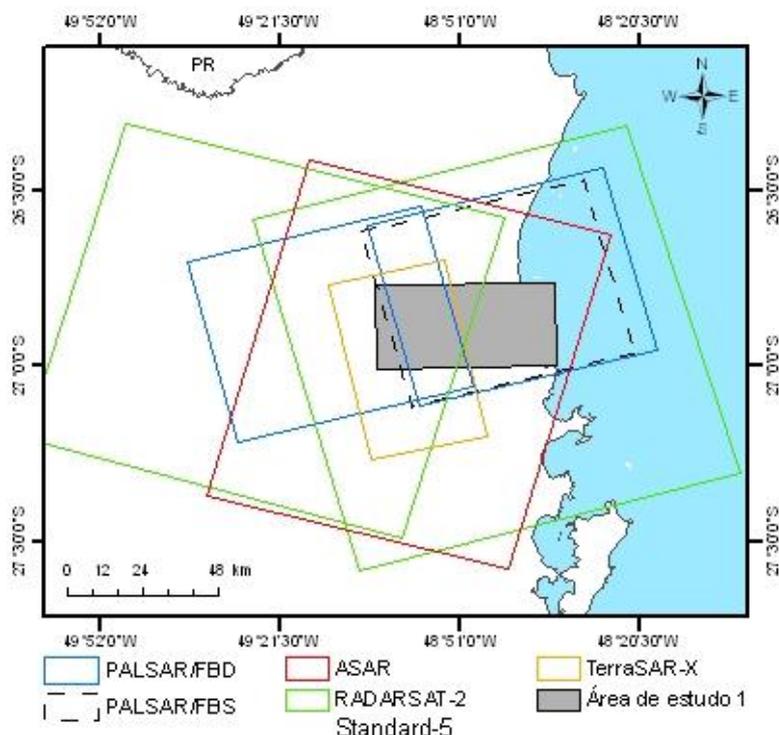


Figura 4.1 – Disposição das imagens SAR adquiridas sobre o Vale do Itajaí.

#### 4.1.1. Dados de Precipitação

A partir do histórico de precipitação da estação pluviométrica localizada na cidade de Blumenau foi possível notar que, até os meses de agosto e setembro de 2008, o regime de chuvas na região estava com comportamento pouco acima do normal, conforme mostra o gráfico da Figura 4.2.

A precipitação diária observada no período de aquisição das imagens FBD/PALSAR mostra que, anteriormente à passagem do satélite, foi registrada a ocorrência 24 mm de chuva no dia 13/09 e 0,60 mm no dia 30/09 (Figura 4.3). Neste sentido foi considerado que estas imagens foram adquiridas sob condição de ocorrência de precipitação leve.

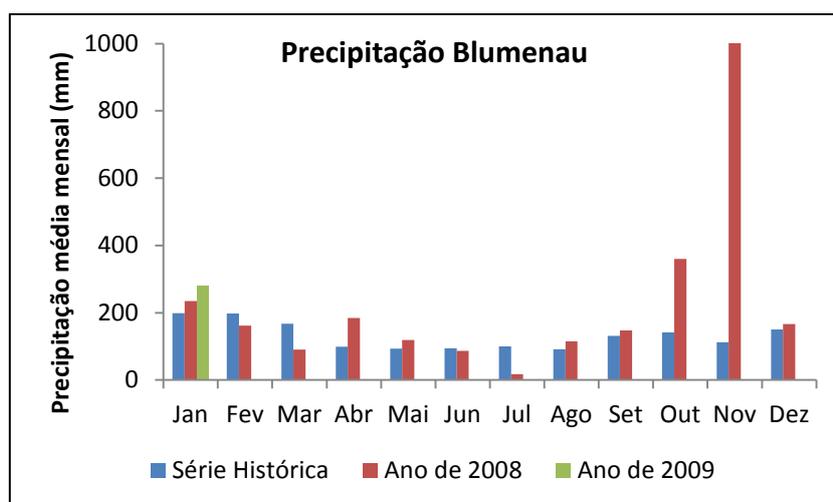


Figura 4.2 – Precipitação registrada em Blumenau. Em azul a série histórica média mensal (período 1944-2007), em vermelho o ano de 2008, em verde o mês de janeiro de 2009.

Fonte: ANA (2009).

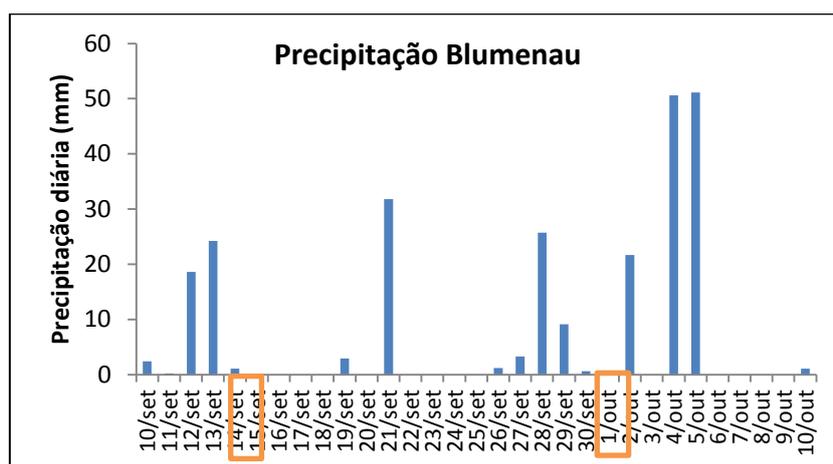


Figura 4.3 – Precipitação diária observada em Blumenau para o período de aquisição das imagens FBD/PALSAR (destacada).

Fonte: ANA (2009).

Conforme observado no gráfico da Figura 4.2, as precipitações diárias registrada no mês de outubro apresentaram um comportamento anormal, sendo que neste mês foi registrado um total mensal de 360 mm contra os 150 mm de média mensal da série histórica. Durante o mês de novembro as chuvas persistiram, com máximos diários de até 50 mm, até que entre os dias 22 e 24 ocorreram as fortes precipitações (cerca de 550 mm registrados na estação de Blumenau). As Figuras 4.4 e Figuras 4.5 apresentam

os registros diários de precipitação, observados nos meses de outubro e novembro, respectivamente.

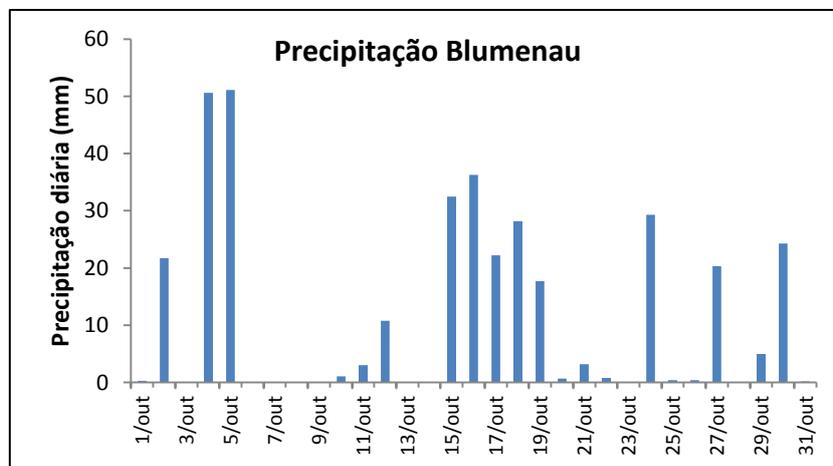


Figura 4.4 – Precipitação diária observada em Blumenau para o período de 01 a 31 de outubro de 2008. Fonte: ANA (2009).

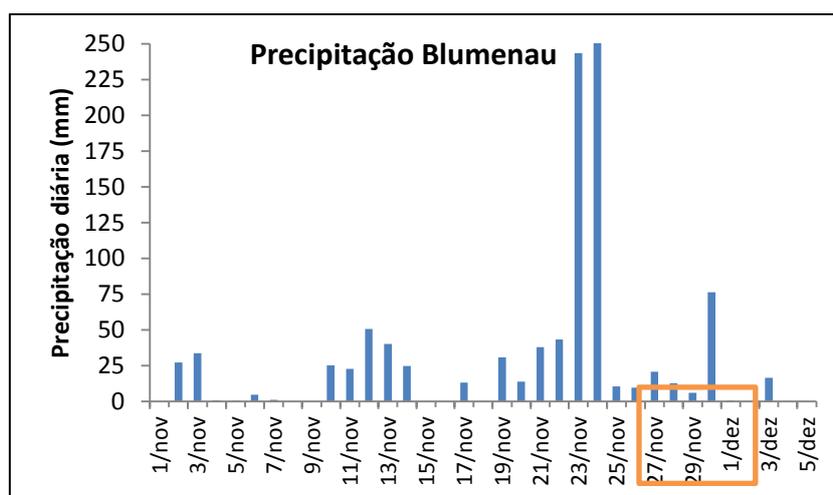


Figura 4.5 – Precipitação diária observada em Blumenau para o período de 01 de novembro a 05 de dezembro de 2008. Área destacada corresponde ao período de aquisição das imagens SAR após fortes chuvas.

Fonte: ANA (2009).

Os valores de precipitação observados no mês de dezembro de 2008 e janeiro de 2009 ficaram pouco acima do nível médio da série histórica, conforme pode ser visto na Figura 4.2. Em dezembro de 2008 foi registrado na estação de Blumenau 166 mm de chuva, com máximos diários de até 36 mm. Já durante o mês de janeiro de 2009, foi registrada uma precipitação total de 281 mm, sem a ocorrência de valores superiores a

45 mm de precipitação em um dia. Nas Figuras 4.6 e 4.7 são apresentados os valores de precipitação diária observada nos meses de dezembro de 2008 e janeiro de 2009, respectivamente.

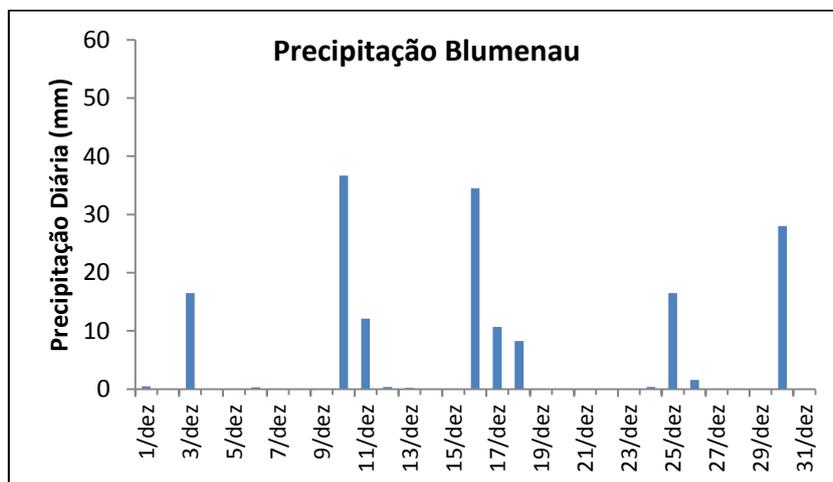


Figura 4.6 – Precipitação diária observada em Blumenau para o mês de dezembro de 2008.  
Fonte: ANA (2009).

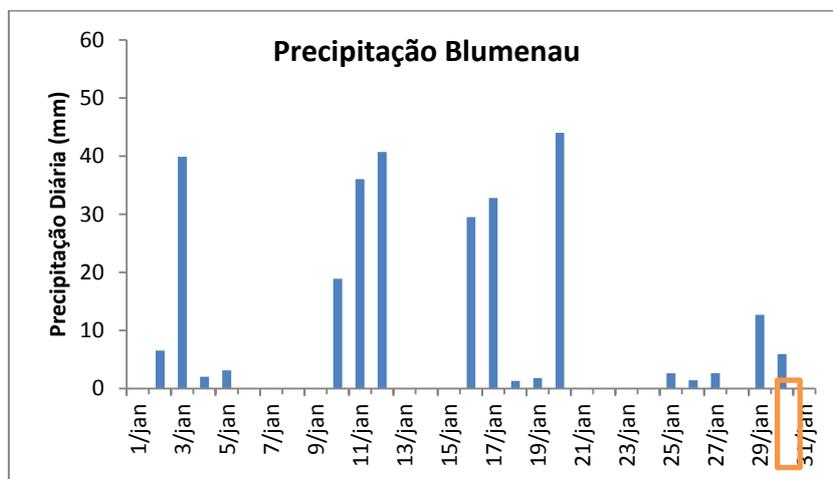


Figura 4.7 – Precipitação diária observada em Blumenau para o mês de janeiro de 2009 e data de aquisição da imagem FBS/PALSAR.

Fonte: ANA (2009).

## 4.2. Abordagem metodológica

Para a realização deste trabalho foram definidas três etapas, apresentadas no fluxograma da Figura 4.8 e descritas nos itens a seguir.

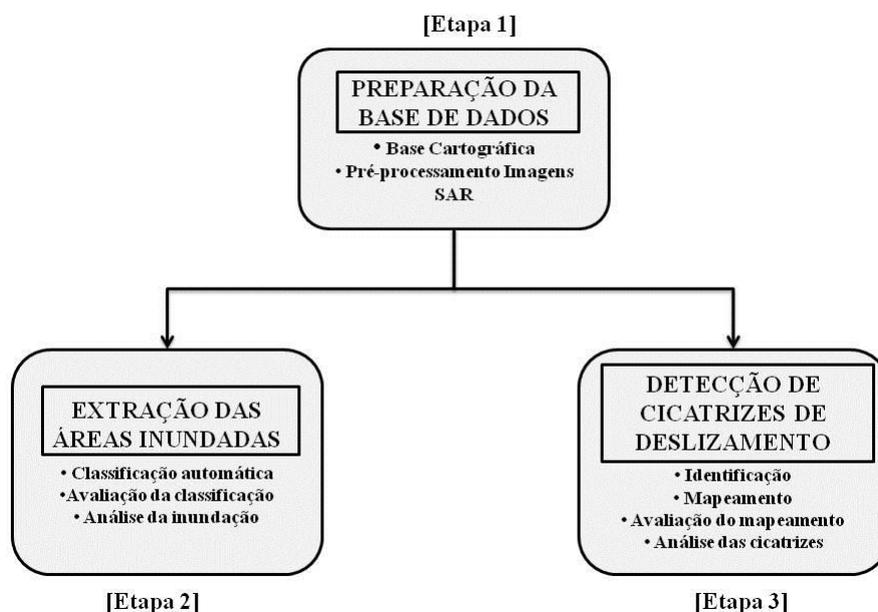


Figura 4.8 – Fluxograma referente às etapas desenvolvidas ao longo da pesquisa.

### 4.2.1. Preparação da base de dados

Esta etapa correspondeu à organização da base de dados cartográficos (topográficos e temáticos), ao pré-processamento das imagens SAR e avaliação planimétrica das ortoimagens SAR. Os procedimentos adotados na realização desta etapa são apresentados no fluxograma da Figura 4.9.

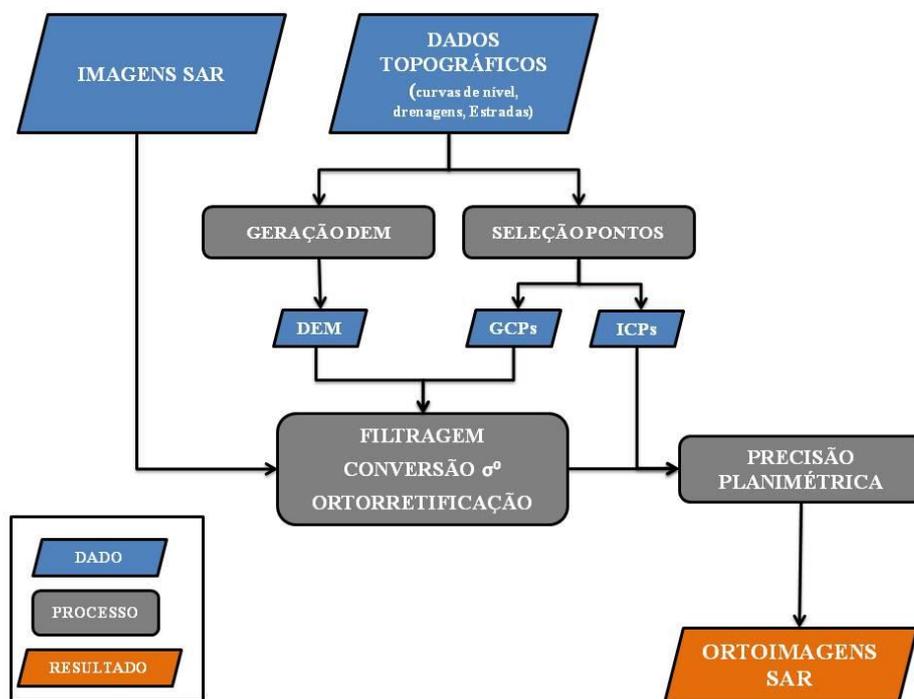


Figura 4.9 – Fluxograma referente à etapa de trabalho 1.

O DEM utilizado para o processo de ortorretificação das imagens SAR foi elaborado a partir da interpolação dos valores de cota, contidos nas curvas de nível de escala 1:50.000 fornecido por GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC (2008). Este procedimento foi realizado utilizando o software Arc Gis 9.2, com a ferramenta *Topo to Raster* do módulo *3D Analyst Tools*. Este método de interpolação é baseado em Hutchinson (1989), no qual é produzida uma grade regular retangular, especificamente projetado para criar um DEM hidrologicamente correto. O DEM foi gerado no formato *Geotiff* com um tamanho de pixel de 10 metros, o que corresponde à metade do valor da equidistância das curvas de nível de escala 1:50.000 (20 metros).

Para a obtenção do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) das imagens do sensor PALSAR, adquiridas nos modos FBD e FBS, foi utilizada a seguinte equação, conforme Shimada et al., (2009):

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 * \log_{10}(\text{DN}^2) + \text{CF} \quad (1)$$

na qual CF representa o fator de conversão e DN é o valor digital da imagem amplitude em 16 bits. Para as imagens FBD de polarização HH, adquiridas antes 08 de janeiro de 2009, o valor de CF foi de -83,2. Para a imagem FBS de polarização HH, adquirida posterior a 09 de janeiro de 2009, o valor de CF foi de -83,0 (JAXA, 2010).

Os valores de  $\sigma^0$  da imagem TSX foram obtidos por meio da equação (Fritz et al., 2009):

$$\sigma^0 = (k_s * |DN|^2 - NENB) * \sin\theta \quad (2)$$

na qual  $k_s$  é o fator de calibração fornecido nos metadados, DN é o valor digital da imagem amplitude em 16 bits, NENB corresponde ao ruído equivalente a  $\beta^0$  (*Noise Equivalent Beta Naught*),  $\theta$  é o ângulo de incidência da imagem.

As imagens ASAR e STD5/RDT-2 foram transformadas para valores de  $\sigma^0$  por meio do algoritmo Sarsigm (*Generate Calibrated Radar Backscatter*) do software PCI Geomatica v.10.3. Vale a pena destacar que as imagens em  $\sigma^0$  dos sensores ASAR, STD5/RDT-2 e TSX, foram geradas na base linear e posteriormente transformadas para a base logarítmica por meio da seguinte equação:

$$dB: 10 * \log_{10}(DN^2) \quad (3)$$

na qual DN corresponde a imagem  $\sigma^0$  em escala linear.

Devido às características de relevo da área de estudo e da geometria de aquisição das imagens SAR, foi realizada a correção geométrica rigorosa (ortorretificação) baseada em modelagem matemática utilizando o módulo *OrthoEngine* do software PCI Geomatica v.10.3. Para radares orbitais, o *OrthoEngine* oferece três opções de modelagem matemática: a modelagem Toutin, a modelagem Radar Specific e a modelagem RPC (*Rational Polynomial Coefficient*).

A modelagem Toutin não é indicada quando se usa apenas uma porção da imagem original e não se dispõe de pontos de controle (*Ground Control Points - GCPs*) com boa

distribuição em área e elevação. A modelagem RPC é baseada em um ajuste polinomial com auxílio de um DEM e de GCP's ou de um arquivo auxiliar fornecido nas informações de efemérides do satélite. Quando não se dispõe das informações do satélite, este método é menos rigoroso do que as modelagens Toutin e Radar Specific (PCI GEOMATICS, 2010).

Todas as imagens SAR foram ortorretificadas por meio da modelagem Radar Specific, que utiliza a equação *Ranger Doppler* e aproveita o máximo das informações do posicionamento do satélite e do sensor. A modelagem Radar Specific usa parâmetros adicionais do satélite em órbita para diminuir a quantidade de GCPs necessários. Esta modelagem foi aplicada com o uso de GCPs extraídos da base cartográfica digital de escala de 1:50.000.

Durante a execução do processamento das ortorretificações das imagens em  $\sigma^0$  foi aplicado o filtro *Enhanced-Frost* para a redução do ruído *speckle*, com janela 3x3 nas imagens de maior resolução espacial (SM/TSX e FBS/PALSAR) e 5x5 nas imagens de média resolução (ASAR, STD5/RDT-2 e FBD/PALSAR). Estes tamanhos de filtros foram selecionados para evitar maior degradação dos detalhes das imagens.

A precisão posicional das ortoimagens SAR foi avaliada a partir do cálculo do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE) e do Erro Circular (*Circular Map Accuracy Standard* - CMAS) com 90% de probabilidade (NSDI, 1998). O RMSE foi calculado a partir da comparação das coordenadas de pontos independentes de validação (*Independent Check Points* - ICPs) extraídos da base cartográfica de escala 1:50.000 com as coordenadas destes mesmos pontos observados nas ortoimagens, usando a seguinte expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(X_i - X_{carta})^2 + (Y_i - Y_{carta})^2}{N-1}} \quad (4)$$

onde  $X_i$  e  $Y_i$  são as coordenadas de pontos notáveis identificados na ortoimagem SAR,  $X_{carta}$  e  $Y_{carta}$  as coordenadas dos ICPs correspondentes medidos na base planimétrica, e  $N$  é o número de ICPs considerados.

O CMAS é uma medida dos erros combinados em latitude e longitude da planimetria da ortoimagem analisada. Trata-se de um raio circular (metros) que engloba 90% dos erros de planimetria no produto analisado, em relação às posições reais no terreno. O cálculo do valor de CMAS foi realizado por meio da seguinte equação (NSDI, 1998):

$$CMAS = 2,15 \times RMSE \quad (5)$$

na qual, o valor da constante 2,15 corresponde ao valor tabulado para 90% de probabilidade dos erros de planimetria. A Figura 4.10 apresenta a distribuição dos pontos de validação (ICPs) sobre a área de estudo. Os GCPs e ICPs foram obtidos por meio da identificação de feições notáveis (cruzamentos de estradas, pontes sobre rios e interseção de cursos d' água), considerando uma melhor distribuição em área e elevação sobre as imagens.

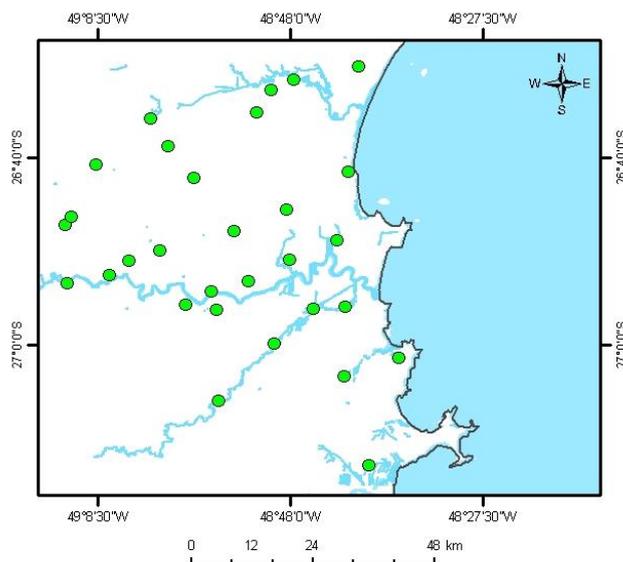


Figura 4.10 – Distribuição espacial dos ICPs utilizados na validação da planimetria.

#### 4.2.2. Extração e análise das áreas inundadas

A segunda etapa refere-se ao mapeamento multitemporal das áreas afetadas pelas inundações e análise da dinâmica da inundação sobre a região de Gaspar. Nesta etapa foi considerando principalmente a informação de brilho (intensidade do retroespalhamento) para extrair as classes de interesse.

Primeiramente foi realizada uma análise visual e descritiva de áreas com corpos d'água e de vegetação alagada. Para isto foi elaborada uma composição colorida, no espaço RGB (R-vermelho, G-verde, B-azul), das ortoimagens adquiridas em diferentes datas (antes e após as fortes chuvas) e com diferentes comprimentos de onda (banda X-HH, C-HH e L-HH). Para a classificação das áreas inundadas em cada ortoimagem SAR, foram realizadas as fases apresentadas no fluxograma da figura 4.11.

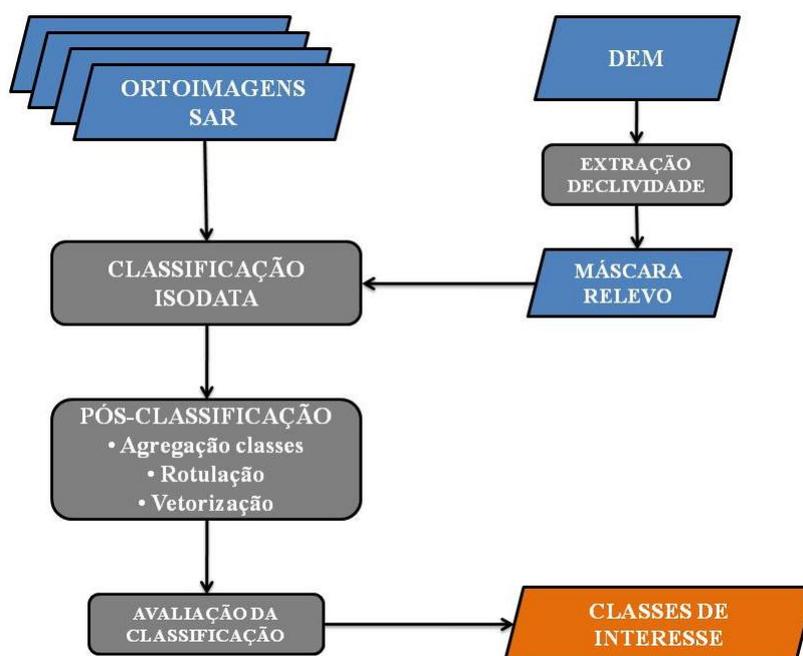


Figura 4.11 – Fluxograma referente à etapa 2.

A classificação ISODATA foi realizada a partir das ortoimagens SAR em  $\sigma^0$ . Para minimizar o efeito do relevo acidentado e da geometria de aquisição das imagens de baixa incidência, foi gerada uma máscara (Figura 4.12), que excluiu regiões de

respostas similares entre corpos d'água e áreas de sombras radar nas vertentes opostas à iluminação do sensor. Dessa forma a classificação foi realizada apenas na área da máscara. Esta máscara foi gerada a partir da informação de declividade derivada do DEM de escala 1:50.000, sendo consideradas áreas sujeitas a inundação os terrenos com declividade de até 8°, ou seja, áreas com relevo plano ou suave ondulado conforme definido por EMBRAPA (1999).

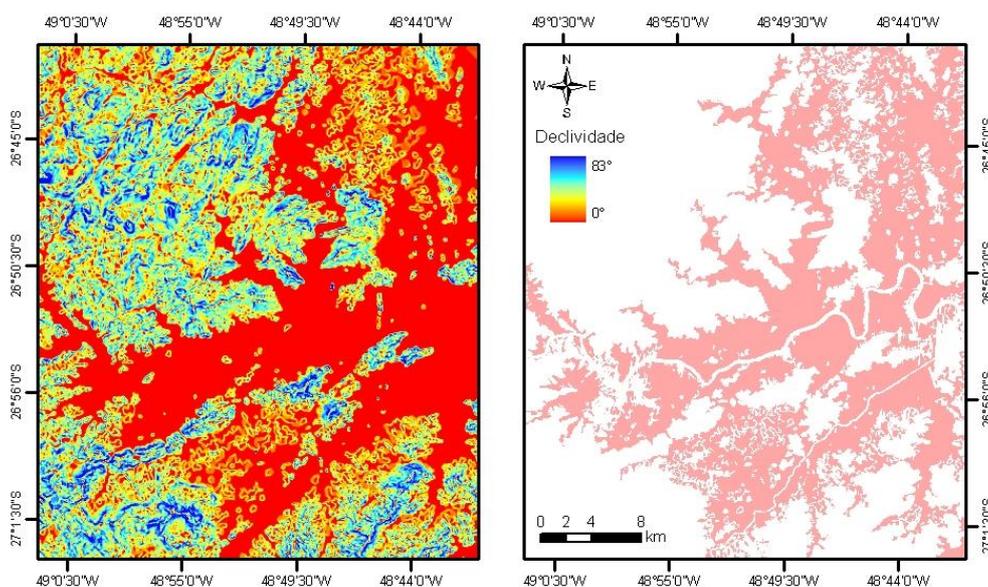


Figura 4.12 – Máscara de áreas com relevo com declividade até 8°.

O classificador não supervisionado ISODATA foi selecionado pelo fato de não necessitar de informações prévias de campo (amostras), permitindo assim a definição das classes em etapa posterior à classificação. Esta alternativa possibilita um processamento rápido, condição muitas vezes necessária em situações de emergência como em desastres naturais. Este algoritmo realiza um agrupamento de pixels segundo suas características de respostas espectrais com estatísticas similares (*clusters* ou agrupamentos) e o processamento leva em consideração parâmetros da classificação como número de classes, número de interações, limiar de mudança entre outros (SCHOWENGERDT, 2007).

Foram definidas três classes de interesse a serem discriminadas nas ortoimagens: corpos d'água antes e depois do evento, áreas inundadas e vegetação alagada (Figura 4.13). Os corpos d'água permanentes como os canais de drenagens, rios e lagos, foram extraídos das cartas topográficas de escala 1:50.000. As manchas de inundações e áreas de vegetação alagada foram obtidas a partir da classificação das imagens ASAR, STD5/RDT-2 e TSX, com datas de aquisições durante o evento de 2008. Os corpos d'água antes do evento foram identificados por meio da classificação das imagens PALSAR, modo FBD, adquiridas em setembro e outubro de 2008. Já os corpos d'água após o evento, foram identificados através da imagem PALSAR, modo FBS, com aquisição em janeiro de 2009. Todas as imagens utilizadas são de polarização paralela horizontal (HH).

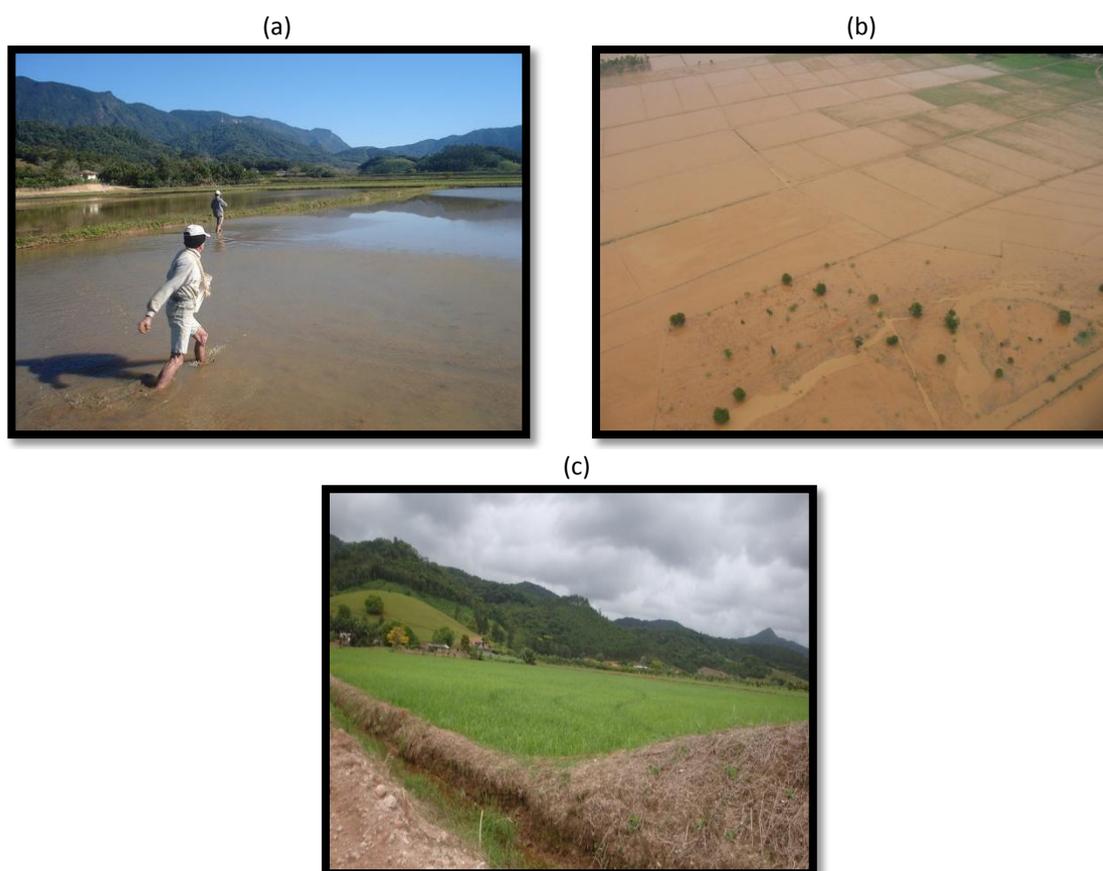


Figura 4.13 – Classes de interesse a serem mapeadas: (a) corpos d'água antes do evento (b) áreas inundadas no evento de 2008; (c) vegetação alagada (dique de arroz irrigado). Fotos: Joel Pellerin, Rogério Marinho e Ampezzan Daniel Luiz.

Os corpos d'água classificados nas ortoimagens, adquiridas antes e depois do desastre de 2008, correspondem às áreas de cultivo de arroz irrigado em período de semeadura, cobertos por uma lâmina d'água. Já os corpos d'água classificados nas ortoimagens adquiridas durante o período de desastre, referem-se às áreas inundadas pelas fortes chuvas de 2008. Ambos os corpos d'água apresentam os menores valores de retroespalhamento nas ortoimagens SAR. Isto ocorre devido à resposta especular do sinal emitido pelo sensor, que sobre superfícies lisas registram pouco ou nenhum espalhamento na direção da antena do sensor, como por exemplo, em terrenos com a presença de uma lâmina d'água e sem a influência de correntezas ou ventos fortes. Este padrão de resposta foi associado a tonalidades escuras nas imagens SAR, conforme pode ser observado na Figura 4.14.

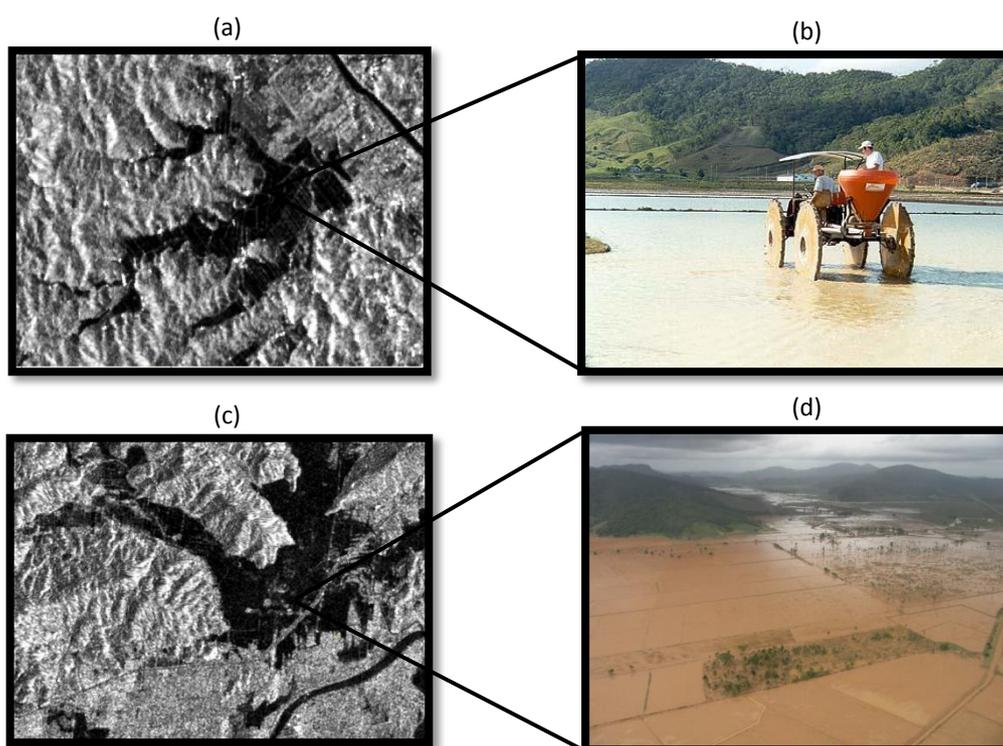


Figura 4.14 – Corpos d'água antes da inundação e áreas inundadas. (a) resposta de corpos d'água antes do desastre na imagem FBD/PALSAR de 01/10/2008; (b) dique de arroz irrigado antes do desastre; (c) resposta de área inundada detectada pelo sensor ASAR em 27/11/2008; (d) Foto sobre região inundada em 02/12/2008. Fotos: EPAGRI e Joel Pellerin.

A classe vegetação alagada definida neste trabalho, correspondeu principalmente às plantações de arroz irrigado, identificadas por meio da análise de áreas com elevada resposta no retroespalhamento, conforme observado na Figura 4.15. Esta resposta de alto retroespalhamento foi associada à presença de água em áreas com predomínio de cultivos agrícolas (arroz irrigado e outras plantações), que não foram totalmente submersos pela água nas imagens obtidas durante o período de desastre. Nesta situação ocorre o espalhamento do tipo volumétrico e *double-bounce*, caracterizado principalmente pela interação entre a superfície d'água e do dossel da vegetação (WANG et al., 2009). Na imagem FBS/PALSAR, adquirida após o período de inundação, esta resposta foi detectada ao longo de toda a planície do baixo e médio rio Itajaí-açu, devido ao crescimento (maturação) dos plantios de arroz irrigado remanescentes do desastre de 2008, como pode ser observado na Figura 4.15 (d).

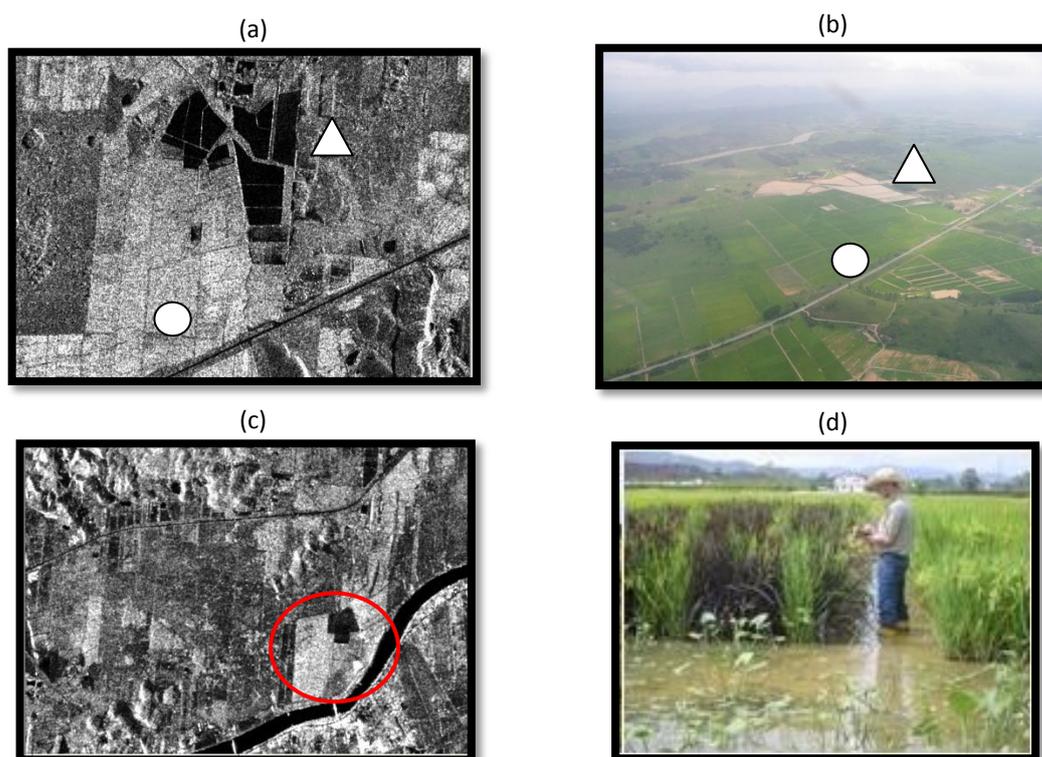


Figura 4.15 – Vegetação alagada sobre a área em estudo. (a) área de vegetação alagada na imagem SM/TSX de 01/02/2008; (b) campos de arroz irrigado em 05/12/2008; (c) resposta de vegetação alagada detectada pelo sensor FBS/PALSAR em 30/01/2009; (d) dique de arroz irrigado em período de colheita. Fotos: Joel Pellerin e EPAGRI.

A escolha dos parâmetros de entrada para a execução do classificador ISODATA foi realizado sobre uma área de referência, levando em consideração o resultado da separação entre as classes de interesse. O algoritmo ISOCLUS (*Isodata Clustering Program*) implementado no PCI Geomatica versão 10.3 foi utilizado para a classificação ISODATA. Os parâmetros que são necessários para a classificação são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na execução do ISODATA.

Nome	Descrição
<i>Number of Clusters Desired</i>	Especificação do número de <i>cluster</i> (agrupamento) desejado. Trata-se apenas de uma estimativa inicial.
<i>Maximum Number of Clusters</i>	Especificação do número máximo de cluster permitido.
<i>Minimum Number of Clusters</i>	Especificação do número mínimo de cluster permitido.
<i>Maximum Number of Iterations</i>	Máximo de vezes que o algoritmo pode reagrupar os pixels.
<i>Movement Threshold</i>	Determinar o limiar de mudança para recálculo dos clusters.
<i>Standard Deviation</i>	Se um cluster tiver um valor de desvio padrão maior que o especificado, ocorrerá divisão do mesmo.
<i>Background Grey Level Value</i>	Especificação do valor de pixel que não deve ser considerado no processo de classificação.

Fonte: PCI GEOMATICS (2010).

Durante a realização desta etapa, foram utilizados os valores padrão sugeridos pelo PCI GEOMATICS (2010), sendo o valor 20 para o número de interações, limiar de mudança de 0,01 e desvio padrão 10. Os valores de números mínimo e máximo de agrupamentos variaram para cada ortoimagem.

Após a geração dos agrupamentos pelo ISODATA foram executados os procedimentos de pós-classificação, que consistiu no remapeamento dos agrupamentos para as classes desejadas, rotulagem das classes e transformação do mapa temático de formato *raster* para a representação vetorial. A atribuição do significado de cada agrupamento durante o processo de agregação foi realizada com base na análise exploratória dos valores de  $\sigma^0$ , dados de campo (fotos) e análise visual. A análise

exploratória consistiu na visualização por meio de gráficos do tipo *box plots* dos valores de  $\sigma^0$ , oriundos de um conjunto de pontos amostrados aleatoriamente em cada classe (corpos d'água, não água e vegetação alagada) para cada ortoimagem.

Em muitos casos de inundação, não é possível a produção de um mapa detalhado e preciso com o registro espacial das áreas afetadas. Neste sentido, esta pesquisa não teve acesso a nenhum documento ou dados cartográficos auxiliares, que pudessem ser utilizados como referência no processo de validação dos resultados das classificações realizadas.

Considerando-se a necessidade de uma avaliação do desempenho da classificação, a acurácia do mapeamento foi realizada por meio de comparação das classificações de cada ortoimagem SAR com um conjunto de pontos de referência, distribuídos aleatoriamente sobre cada ortoimagem. A atribuição de cada classe para cada amostra foi realizada por meio de interpretação visual de um especialista em imagens SAR, sem que este tivesse contato prévio com os resultados das classificações. Este tipo de abordagem pode ser observada em trabalhos anteriores, como de Dewan et al., (2006); Gianinetto et al., (2007); Song et al., 2007), os quais utilizaram o recurso da interpretação visual para avaliar desempenho de classificação automática.

Desta forma, a acurácia das classificações foi obtida por meio da análise da matriz de confusão, permitindo assim a extração da exatidão global e do índice *kappa* para a verificação da concordância dos resultados das classificações em relação aos dados de referência.

A análise da dinâmica temporal (período antes, durante e após o evento de 2008) foi realizada sobre a área de estudo situada na região do Ribeirão Gaspar e Ribeirão Poço Grande (Área de estudo 2). A variabilidade das manchas de inundação e da vegetação alagada, extraídas das classificações das ortomagens, foi analisada em conjunto com dados de precipitação da estação de Blumenau observados durante o período de aquisição das imagens SAR.

### 4.2.3. Detecção das cicatrizes de deslizamentos de terra

De agora em diante, a referência aos deslizamentos de terra será feita nesta pesquisa envolvendo os diferentes tipos de escorregamento de terra (rotacionais e translacionais) ou corridas de massas.

Esta etapa correspondente aos procedimentos empregados para identificação e análise das cicatrizes de deslizamentos de terra sobre imagem SAR de alta resolução espacial. A Figura 4.16 apresenta o fluxograma dos passos realizados.

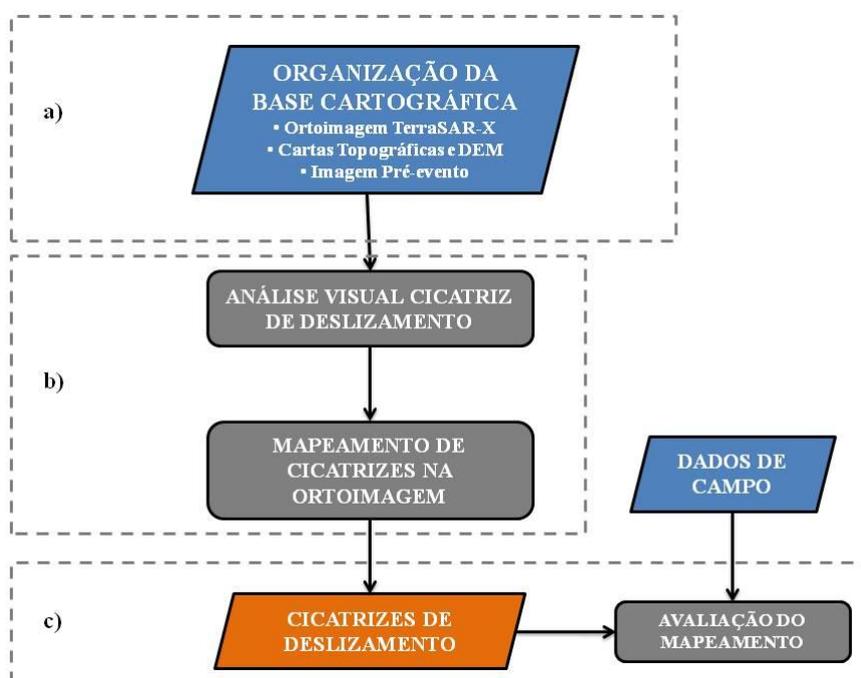


Figura 4.16 – Fluxograma da etapa 3, mapeamento dos deslizamentos de terra.

a) Organização da base cartografia – Antes de iniciar o processo de análise e identificação das cicatrizes de deslizamento de terra foi necessário organizar um banco de dados geográfico com informações sobre a área em estudo. Estes dados consistiram principalmente de informações planimétricas (estradas e canais de drenagem), altimétricas (curvas de nível e o DEM), ambas extraídas de cartas topográficas na

escala de 1:50.000; e de informações sobre a área antes dos deslizamentos obtida por meio da imagem FBD/PALSAR adquirida antes do evento.

b) Análise visual das imagens SAR – A identificação das cicatrizes de deslizamento foi realizado sobre a imagem de melhor resolução espacial (TerraSAR-X, modo Stripmap). O procedimento de interpretação de imagens SAR proposto por Santos et al., (2000) foi adaptado para a identificação e o mapeamento de cicatrizes de deslizamentos de terra ocorridos na região do morro do Baú. A seguir, é descrita o tipo de análise, as características do dado SAR e os procedimentos de interpretação utilizados.

Foi adotada na pesquisa a análise monoscópica sobre a ortoimagem TerraSAR-X, realçada por ampliação linear do contraste, em conjunto com a visão em perspectiva produzida a partir da sobreposição da ortoimagem com um DEM. Esta visão em perspectiva foi realizada por meio do recurso *3D View* do software Global Mapper 11.

A interpretação visual de imagem SAR foi utilizada neste trabalho devido às características da imagem disponível (apenas uma cena de polarização simples), e pelo fato de que feições que caracterizam estes alvos, não puderam ser identificadas utilizando apenas a variação dos níveis de cinza (brilho do retroespalhamento). Assim, foi necessário utilizar uma abordagem que permitisse o uso de informações complementares, como morfologia do terreno e informações de contexto.

Antes de se iniciar o processo de interpretação das cicatrizes, foi necessário avaliar as características da imagem SAR utilizada. A imagem TerraSAR-X utilizada neste trabalho foi adquirida com baixo ângulo de incidência (27,2° a 30,2°) e órbita ascendente (azimute de visada ENE). Devido à posição de passagem do satélite e a necessidade de obtenção rápida de imagem (tempo de revisita) sobre a área afetada, a imagem TerraSAR-X foi adquirida com ângulo de incidência não apropriado para este tipo de relevo.

Conforme observado em Singhroy et al., (1998) e em Singhroy e Saint-Jean (1999), imagens SAR sobre este tipo de terreno deveriam ser adquiridas com incidência de aproximadamente  $45^\circ$ , para reduzir efeitos de distorções geométricas. Neste sentido, cicatrizes de deslizamentos ocorridas em vertentes com orientação frontal ao sensor não puderam ser identificadas nesta pesquisa, devido ao fato que estas feições foram mascaradas por distorções geométricas.

Considerando este fato, foram analisadas cicatrizes de deslizamento localizadas sobre vertentes não afetadas por distorções geométricas do tipo *layover* ou *foreshortening*, conforme ilustrado na Figura 4.17 que representa a visão em perfil do imageamento SAR sobre uma vertente. Vertentes com orientação frontal ao sensor (indicado pela letra “a” na Figura 4.17) são as mais afetadas por *foreshortening* e *layover*. Já parte dorsal da vertente (indicado pela letra “b” na Figura 4.17) corresponde a áreas com menor possibilidade de ocorrência de distorções do tipo *layover* ou *foreshortening*, sob condições de baixa incidência.

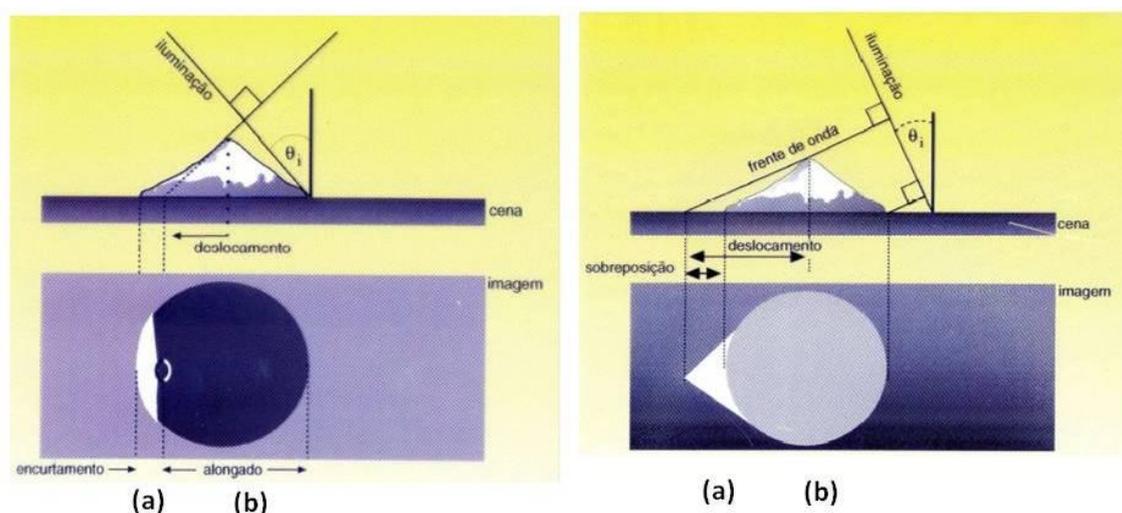


Figura 4.17 – Representação da geometria de imageamento SAR sobre áreas de vertente.  
Fonte: Canada Centre for Remote Sensing (1997).

Para a detecção visual de áreas afetadas por deslizamentos de terra foi necessário levar em consideração além da geometria de imageamento, a resolução espacial do sensor, o comprimento de onda e polarização. As cicatrizes de deslizamento analisadas

possuíam dimensões de centenas de metros e ocorreram principalmente sobre vertentes com cobertura vegetal densa, conforme as fotografias na Figura 4.18.



Figura 4.18 – Fotografias de cicatrizes de deslizamentos sobre a região do Morro do Baú.

Fotos: Joel Pellerin (2008 e 2009).

A vegetação predominante sobre a área em estudo corresponde principalmente às florestas primárias e florestas plantadas de pinheiros ou eucaliptos. Considerando este tipo de cobertura, o comprimento de onda do sensor TerraSAR-X ( $\lambda = 3,11$  cm, banda X) e a polarização paralela da imagem (HH), o retroespalhamento registrado pelo sensor é do tipo superficial do topo do dossel, resultado da interação da parte superior da copa destas florestas. A rugosidade deste dossel (variação na altura das árvores) é elevada e possui influência na textura da imagem, que por sua vez está relacionada à resolução espacial do sensor (Figura 4.19).

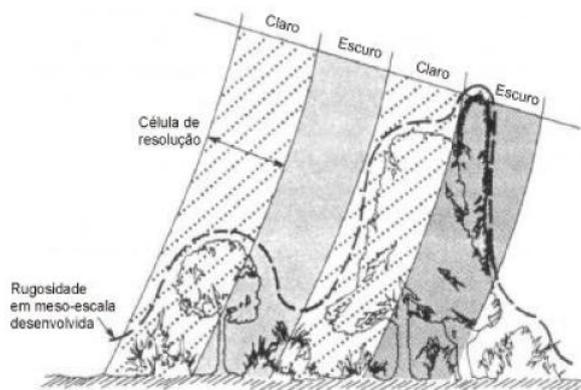


Figura 4.19 – Composição da textura sobre uma imagem SAR. Fonte: Trevett (1986).

Por outro lado, o interior de uma cicatriz apresenta principalmente a exposição de solo, devido à remoção do material vertente abaixo. Esta redução da rugosidade superficial favorece a ocorrência do mecanismo de espalhamento do tipo especular, ou seja, pouca energia volta para o sensor. Isto permite o contraste com as respostas mais elevadas das áreas de cobertura vegetal do entorno (espalhamento difuso).

Assim, o processo de interpretação da imagem para mapeamento das cicatrizes foi baseado nos elementos de interpretação visual como tonalidade, textura, forma e contexto, considerando-se também a geometria do sensor, os mecanismos de espalhamento e a rugosidade superficial.

Inicialmente, uma análise da aparência de cicatrizes de deslizamento de terra sobre a ortoimagem TerraSAR-X foi realizada com o auxílio de fotografias de áreas afetadas, cedidas pelo geólogo da UFSC, Dr. Joel Pellerin. Após esta análise, foi então elaborado um modelo fotointerpretativo que serviu de guia no processo de mapeamento das cicatrizes de escorregamento (Figura 4.20). Como dado auxiliar no processo de interpretação foi utilizada a imagem FBD/PALSAR, adquirida anteriormente aos deslizamentos, e a localização de estradas e drenagens, oriundos da carta topográfica.

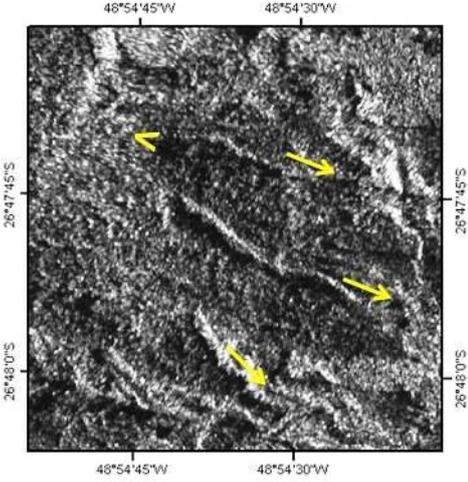
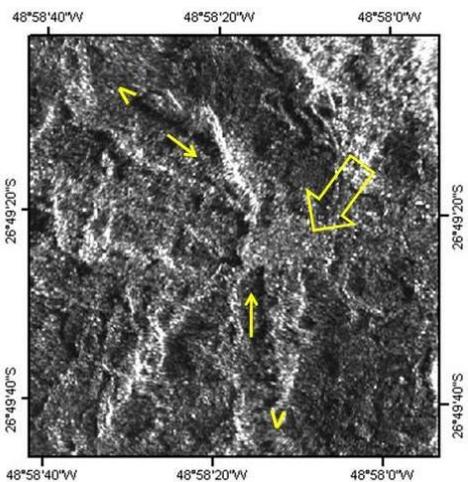
Objeto	Características
<p style="text-align: center;"><b>Cicatriz de deslizamentos</b></p>  <p>The image shows a grayscale satellite view of a landslide scar. The scar is a dark, elongated feature running from the top-left towards the bottom-right. Yellow arrows point downwards along the scar, indicating the direction of movement. A yellow triangle is located at the top edge of the scar, marking the rupture point. The image is framed with geographic coordinates: 48°54'45"W and 48°54'30"W at the top; 26°47'45"S and 26°48'00"S on the sides; and 48°54'45"W and 48°54'30"W at the bottom.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predomínio tonalidade escura no interior da cicatriz,</li> <li>• Textura lisa devido à remoção da cobertura vegetal,</li> <li>• Forma alongada do topo para a base da vertente,</li> <li>• Vertentes com cobertura florestal,</li> </ul> <p>(△) Ruptura superior da cicatriz. (↓) Direção do movimento.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Material Movimentado</b></p>  <p>The image shows a grayscale satellite view of displaced material. The material appears as a lighter, more textured area compared to the surrounding terrain. Yellow arrows point downwards, indicating the direction of movement. A yellow triangle is located at the top edge of the displaced material, marking the rupture point. The image is framed with geographic coordinates: 48°58'40"W, 48°58'20"W, and 48°58'0"W at the top; 26°49'20"S and 26°49'40"S on the sides; and 48°58'40"W, 48°58'20"W, and 48°58'0"W at the bottom.</p>	<p>Seta amarela indica área com material movimentada resultado de duas cicatrizes de deslizamentos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Predomínio tonalidade cinza médio,</li> <li>• Textura intermediária (médio),</li> <li>• Forma irregular,</li> <li>• Próximo da cicatriz de deslizamento,</li> <li>• Base de vertentes (fundo de vale).</li> </ul> <p>(△) Ruptura superior da cicatriz. (↓) Direção do movimento.</p>

Figura 4.20 – Padrão de resposta de feições de escorregamento de terra sobre ortoimagem TerraSAR-X na região do Morro do Baú.

c) A avaliação do mapeamento dos deslizamentos foi realizada por meio da análise da acurácia de um conjunto cicatrizes previamente selecionada para checagem em campo. Este tipo de abordagem pode ser observado no trabalho de Abdallah et al., (2007), no qual estes autores analisaram a porcentagem de acerto do mapeamento

realizado por meio de identificação visual, em relação aos deslizamentos verificados em campo, sem considerar a dimensão de área.

Foi realizado um trabalho de campo com a finalidade de verificar o acerto na detecção de deslizamentos bem como as características das cicatrizes erroneamente mapeadas. Nesta fase, foi utilizado um GPS de navegação GARMIN GPS II Plus, máquina fotográfica e bússola para a identificação da direção de movimento do deslizamento. A direção de movimento consistiu da obtenção do sentido principal do deslizamento de terra sobre a vertente, na direção de desnível da vertente (do topo para a base). A Figura 4.21 apresenta um exemplo de cicatriz de escorregamento e sua direção de movimento.

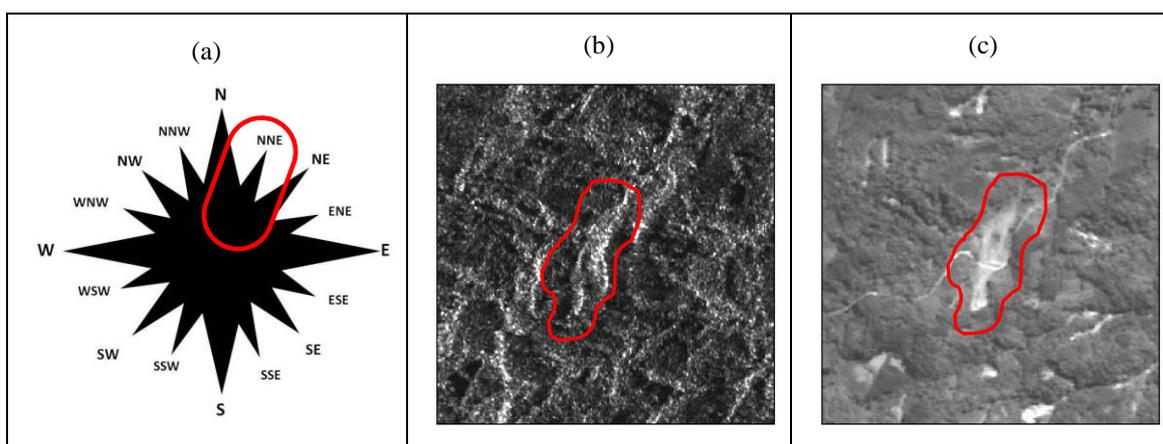


Figura 4.21 – Exemplo da obtenção de direção do movimento de um deslizamento de terra. (a) direção do deslizamento, (b) Cicatriz sobre a região do Alto Baú na ortoimagem TerraSAR-X, (c) Imagem óptica de alta resolução espacial (HRC/CBERS2B) sobre área correspondente.

Durante o trabalho de campo foram visitados pontos com a localização de deslizamento considerando sua acessibilidade (cicatrizes sobre áreas rurais e em florestas) e maior distribuição sobre a área em análise. Os pontos visitados localizaram-se principalmente sobre a bacia do Ribeirão do Baú, situada a oeste do Morro do Baú.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Avaliação planimétrica das ortoimagens SAR

Os valores obtidos no processo de avaliação planimétrica para cada ortoimagem SAR são apresentados na Tabela 5.1 através das estimativas de RMSE nas componentes E, N e total e pelo valor do CMAS.

Tabela 5.1. Acurácia planimétrica das ortoimagens SAR (metros).

IMAGEM	RMSE (E)	RMSE (N)	RMSE (Total)	CMAS	GCPs	ICPs
FBD/PALSAR	11,24 m	19,06 m	22,13 m	47,57 m	10	30
ASAR	20,81 m	19,92 m	28,81 m	61,94 m	10	27
STD5/RST-2 Ascendente	17,03 m	17,27 m	24,26 m	52,16 m	10	27
STD5/RST-2 Descendente	19,82 m	17,83 m	26,66 m	57,31 m	10	20
SM/TSX	4,11 m	4,08 m	5,79 m	12,44 m	08	20
FBS/PALSAR	7,14 m	6,03 m	9,35 m	20,10 m	10	22

Os valores da avaliação planimétrica demonstraram que a precisão das ortoimagens para os sensores de média resolução espacial (FBD/PALSAR, ASAR e STD5/RDT-2) variaram entre 22 e 28 metros. Já para as imagens dos sensores com maior resolução espacial (SM/TSX e FBS/PALSAR) os valores de RMSE variaram de 5 a 9 metros.

Estes resultados de RMSE serviram como orientação para a determinação dos tamanhos de pixels comuns das ortoimagens SAR utilizadas na classificação. Assim, foi definido um espaçamento comum de 25 e 7 metros para as ortoimagens de média e alta resolução espacial, respectivamente. Os resultados das discrepâncias entre as coordenadas podem ser consultados nas Tabelas A.1 a A.12, no Apêndice A.

## **5.2. Mapeamento da inundação**

Inicialmente é realizada uma breve consideração sobre a identificação de áreas inundadas por meio de imagens SAR multitemporais e multifrequência. Em seguida são apresentados e discutidos os resultados obtidos no processo de classificação das ortoimagens SAR para identificação dos corpos d'água pré-evento e pós-evento, áreas inundadas e de vegetação alagada. Por fim, este tópico finaliza apresentando a dinâmica temporal da inundação sobre a região de Gaspar.

### **5.2.1. Identificação de áreas inundadas utilizando dados SAR multitemporais e multissensor**

Uma composição colorida, resultado da combinação de ortoimagens SAR adquiridas em diferentes datas (antes e durante o evento) e diferentes frequências, foi produzida para a região de Gaspar (Figura 5.1). A ortoimagem FBD/PALSAR (L-HH) de 01/10/2008 foi atribuída ao canal vermelho, a ortoimagem STD5/RST-2 (C-HH) de 28/11/2008 ao canal verde e a ortoimagem SM/TSX (X-HH) de 01/12/2008 ao canal azul. Vale destacar que estas ortoimagens possuem visadas para leste (órbitas ascendentes).

Nesta composição colorida (Figura 5.1) os corpos d'água (canais de drenagem, lagos e diques de arroz irrigado), são representados pela tonalidade preta devido ao espalhamento do tipo especular deste alvo em todas as ortoimagens. Estas áreas com tonalidade preta (número 1 e 2 na Figura 5.1) estão relacionadas a terrenos cobertos por água antes e durante o período das fortes chuvas de 2008.

A cor amarela corresponde à contribuição do retroespalhado elevado nas imagens FBD/PALSAR e STD5/RST-2 sobre as áreas urbanas de Gaspar e Blumenau (número 3 na Figura 5.1). Este forte retorno do sinal é resultado da interação do sinal SAR sobre áreas com edificações, nas quais predominam espalhamento por dupla reflexão (*double bounce*) e de refletores de canto (*corner reflectors*).

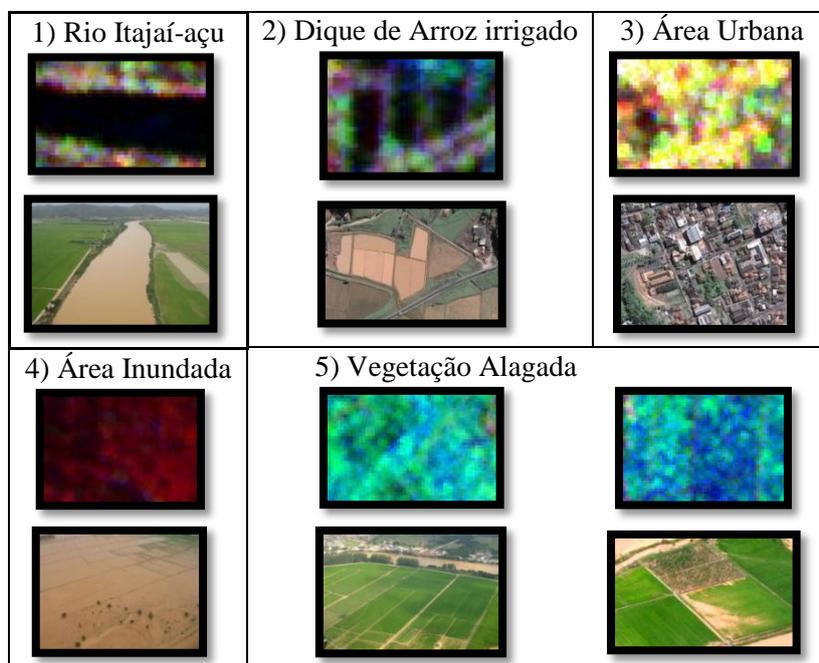
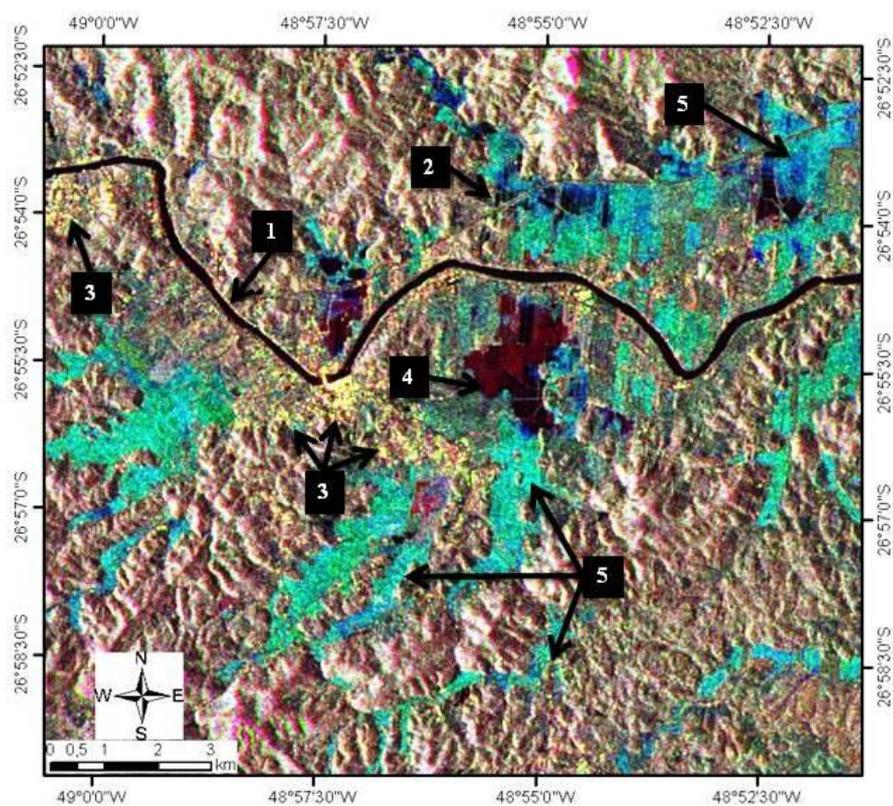


Figura 5.1 – Composição colorida (R) FBD/PALSAR (L-HH) de 01/10/08; (G) STD5/RST-2 (C-HH) de 28/11/08; (B) SM/TSX (X-HH) de 01/12/08, sobre a região de Gaspar.

Fotos: Joel Pellerin (2008).

As áreas inundadas foram identificadas sobre os terrenos que apresentam a tonalidade vermelha escura nesta composição, conforme indicado com o número 4 na Figura 5.1. Isto ocorre devido ao espalhamento difuso do sinal na ortoimagem FBD/PALSAR adquirida antes do evento, em relação às ortoimagens STD5/RST-2 e SM/TSX adquiridas durante o evento de 2008 (áreas com espalhamento especular), conforme observado na Figura 5.2.

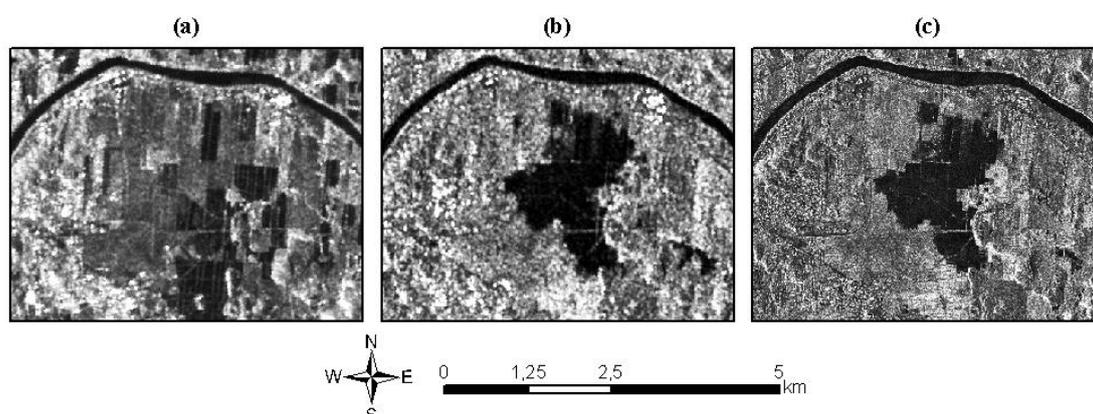


Figura 5.2 – Sequência temporal da mancha de inundação próxima da cidade de Gaspar. (a) FBD/PALSAR de 01/10/08; (b) STD5/RST-2 de 28/11/08; (c) SM/TSX de 01/12/08.

As áreas de vegetação alagada são representadas pelo brilho mais acentuado nas cores verde e ciano, resultado da contribuição do mecanismo de espalhamento do tipo volumétrico e *double bounce* detectado nas ortoimagens STD5/RST-2 e SM/TSX. Da mesma forma, a cor azul também está relacionada à resposta de áreas de vegetação alagada, porém referente ao maior brilho na ortoimagem SM/TSX em relação à ortoimagem STD5/RST-2. Isto pode ter relação com a maior quantidade de precipitação ocorrida entre o período de aquisição destas duas imagens.

De modo geral, foi possível demonstrar que os diferentes mecanismos de espalhamento relacionados às áreas inundadas podem ser interpretados qualitativamente por meio da análise visual de uma composição RGB, combinando dados adquiridos em diferentes datas e frequências.

### 5.2.2. Análise exploratória do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ )

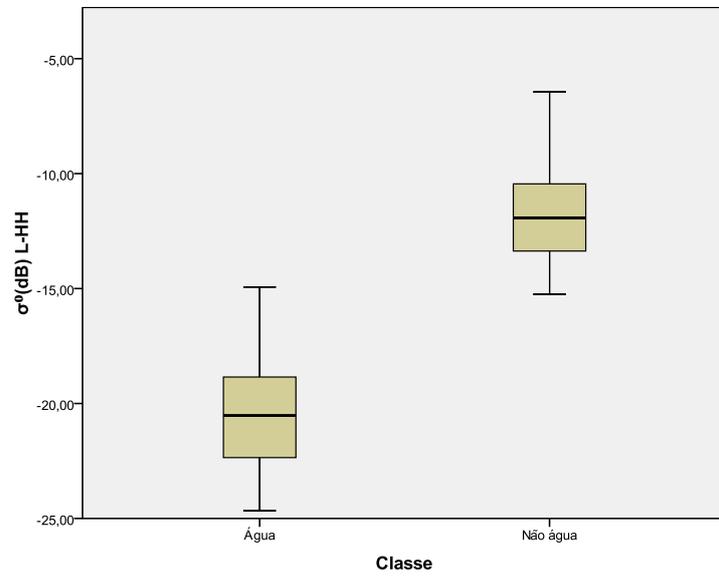
Para a visualização dos resultados são apresentados em seguida os gráficos do tipo *box plot* (Figura 5.3) com os valores de  $\sigma^0$  em decibéis (dB). Em cada gráfico, cada caixa estende-se do quartil inferior ao quartil superior para cada classe, e para cada ortoimagem SAR. A barra horizontal dentro da caixa indica o valor mediano do conjunto de dados amostrados.

Para as imagens FBD e FBS (polarização L-HH) as amostras extraídas sobre corpos d'água apresentaram valores médios de  $\sigma^0$  próximos a -20 (dB). No caso da cena ASAR (polarização C-HH) as amostras desta classe apresentaram valores um pouco superior a -20 (dB). Em ambas as imagens RST-2 (polarização C-HH), os valores médios de  $\sigma^0$  estão próximos de -35 (dB). Sobre a imagem SM/TSX (polarização X-HH) foram obtidos os menores valores em relação a esta classe, próximos a -37 (dB).

Em se tratando da classe vegetação alagada, a imagem FBS (polarização L-HH) apresentou um valor médio próximo de -8 (dB). Na imagem ASAR (polarização C-HH), esta classe possui um valor médio próximo a -7 (dB). Para as imagens RST-2 (polarização C-HH), os valores encontrados de  $\sigma^0$  foram próximos a -10 (dB). Finalmente, valores médios de  $\sigma^0$  próximos a -8 (dB) foram encontrados para esta classe na imagem SM/TSX (polarização X-HH).

De modo geral, foi observada uma clara separação entre os valores de  $\sigma^0$  para as classes corpos d'água, não água e vegetação alagada. Em todas as ortomagens os menores valores de  $\sigma^0$  foram obtidos para a classe corpos d'água, já os maiores valores de  $\sigma^0$  foram extraídos das amostras sobre áreas de vegetação alagada.

FBD/PALSAR 14/09/2008



FBD/PALSAR 01/10/2008

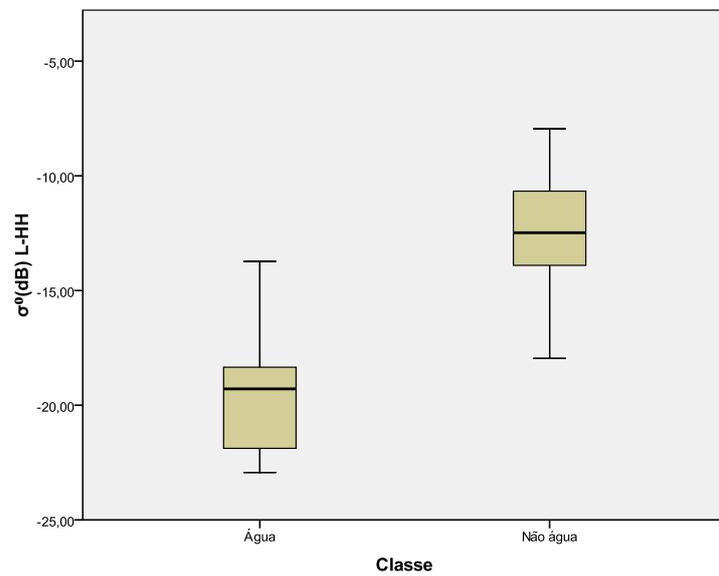


Figura 5.3 (continua) – *Box Plot* com os valores de  $\sigma^0$  (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.

Figura 5.3 (continuação) – *Box Plot* com os valores de  $\sigma^0$  (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.

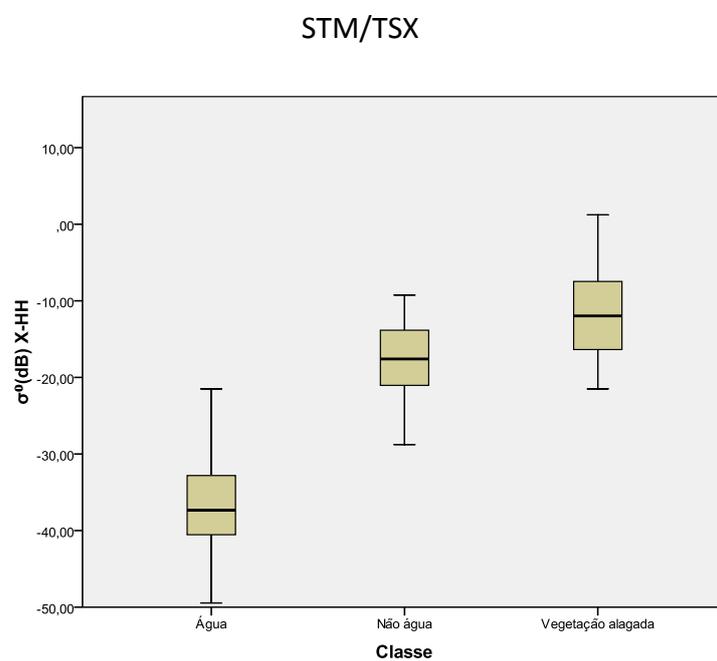
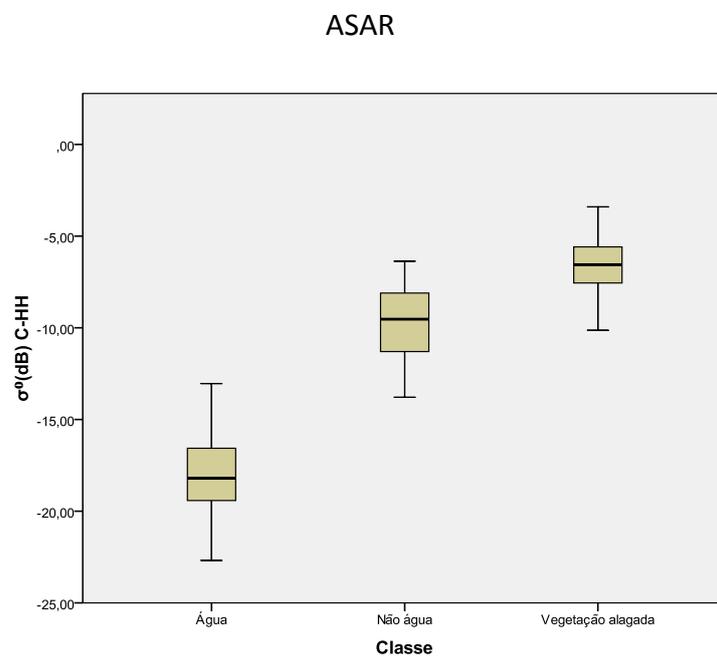


Figura 5.3 (continua) – *Box Plot* com os valores de  $\sigma^0$  (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.

Figura 5.3 (continuação) – *Box Plot* com os valores de  $\sigma^0$  (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.

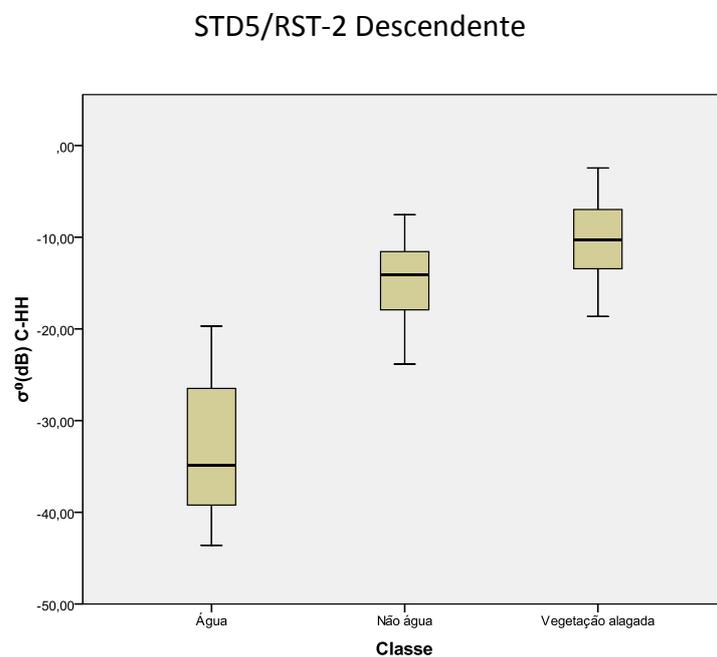
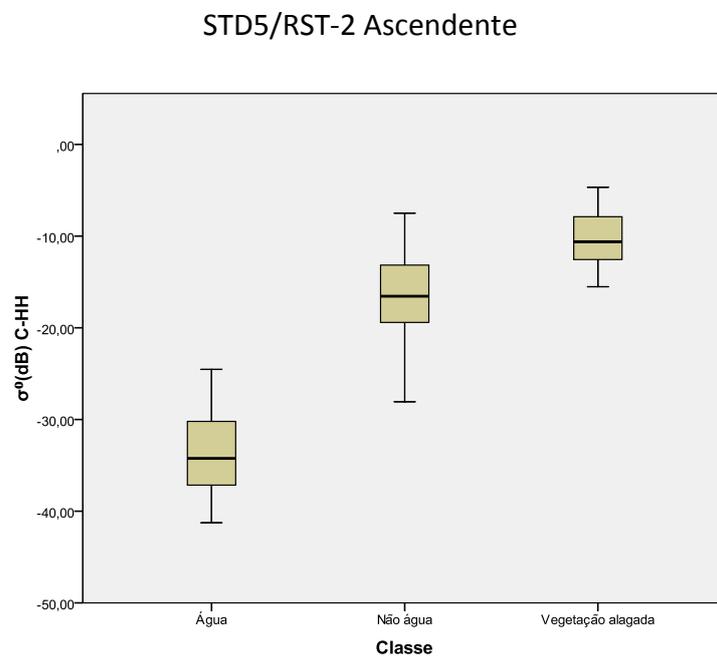


Figura 5.3 (continua) – *Box Plot* com os valores de  $\sigma^0$  (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.

### FBS/PALSAR 30/01/2009

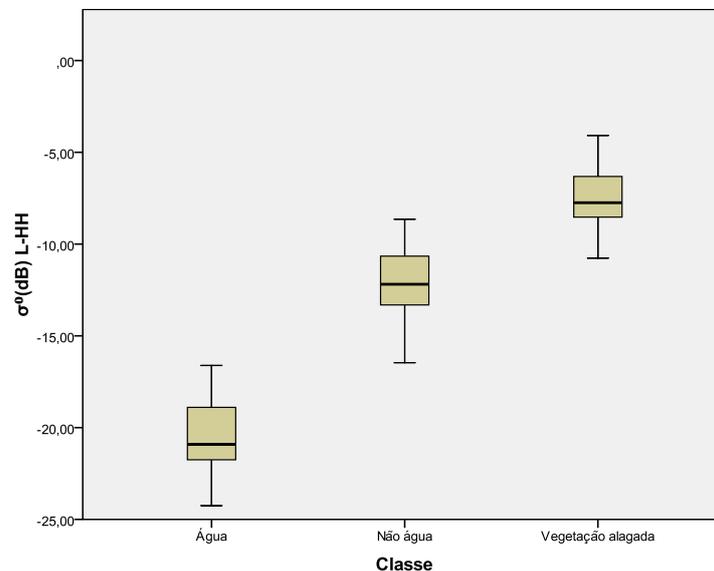


Figura 5.3 (conclusão) – *Box Plot* com os valores de  $\sigma^0$  (dB) para as classes de áreas inundadas analisadas.

Esta análise exploratória dos valores  $\sigma^0$  foi realizada com o objetivo de caracterizar os alvos abordados nesta etapa (corpos d'água e vegetação alagada), e definir os intervalos utilizados como referência no processo de remapeamento dos clusters oriundos da classificação ISOCLUS, cujos resultados são apresentados a seguir.

#### 5.2.3. Classificação das áreas inundadas

Neste item são mostrados os resultados obtidos do processo de classificação das ortoimagens SAR em ordem cronológica (antes, durante e depois da inundaç o). Conforme dito anteriormente, para a classifica o das ortoimagens, foram utilizadas ortoimagens de polariza o HH.

- **Imagens pr -evento**

Corresponde   classifica o de duas cenas do sensor PALSAR, modo FBD, com datas de aquisi o em 14 de setembro e 01 de outubro (Figura 5.4 e Figura 5.5), ou seja, 68 e 51

dias antes das fortes chuvas de novembro de 2008. Estes corpos d'água, detectados antes do desastre, são os diques de arroz irrigado em período de semeadura.

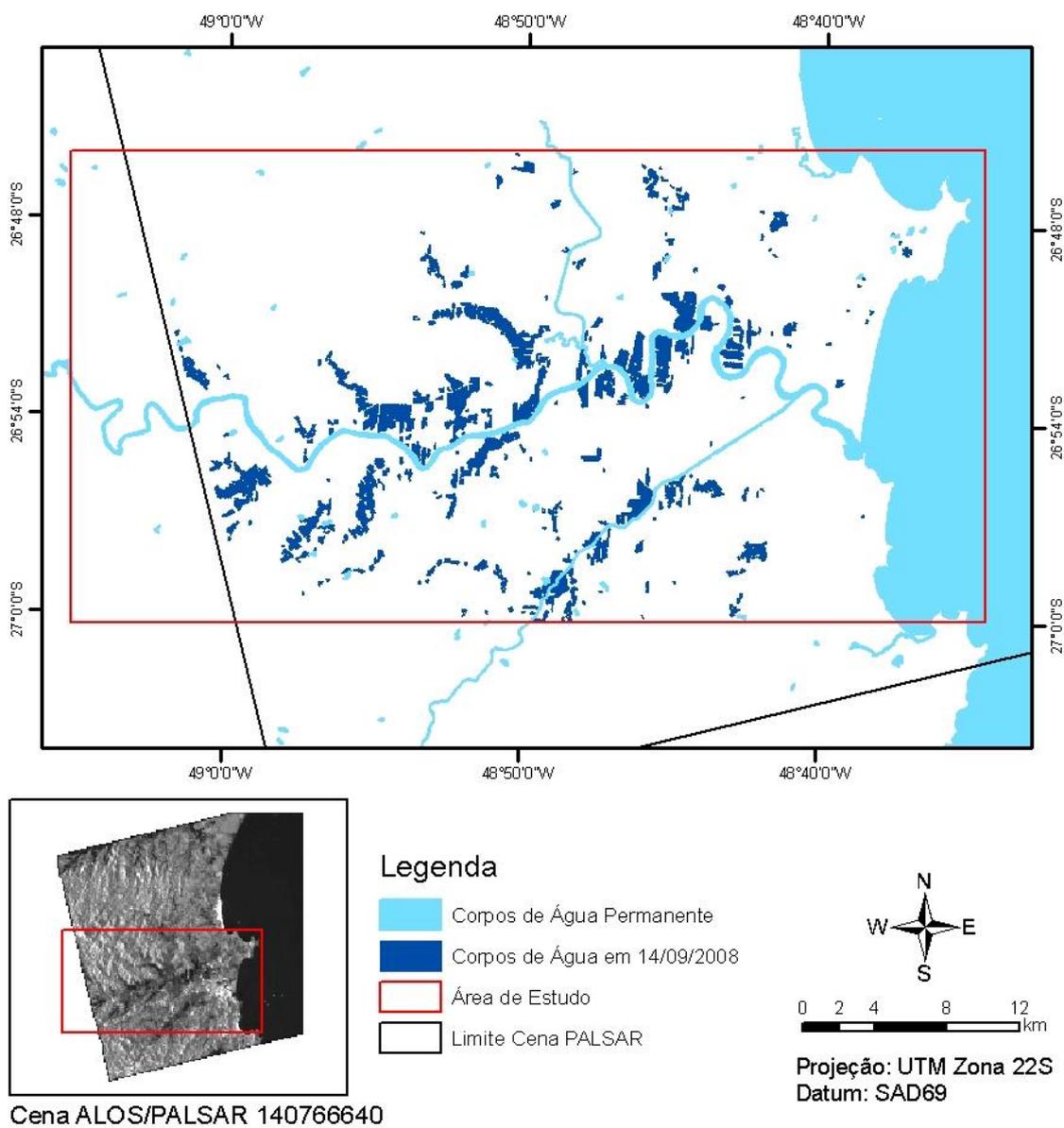


Figura 5.4 – Resultado da classificação da ortomagem FBD/PALSAR (polarização L-HH) de 14/09/2008.

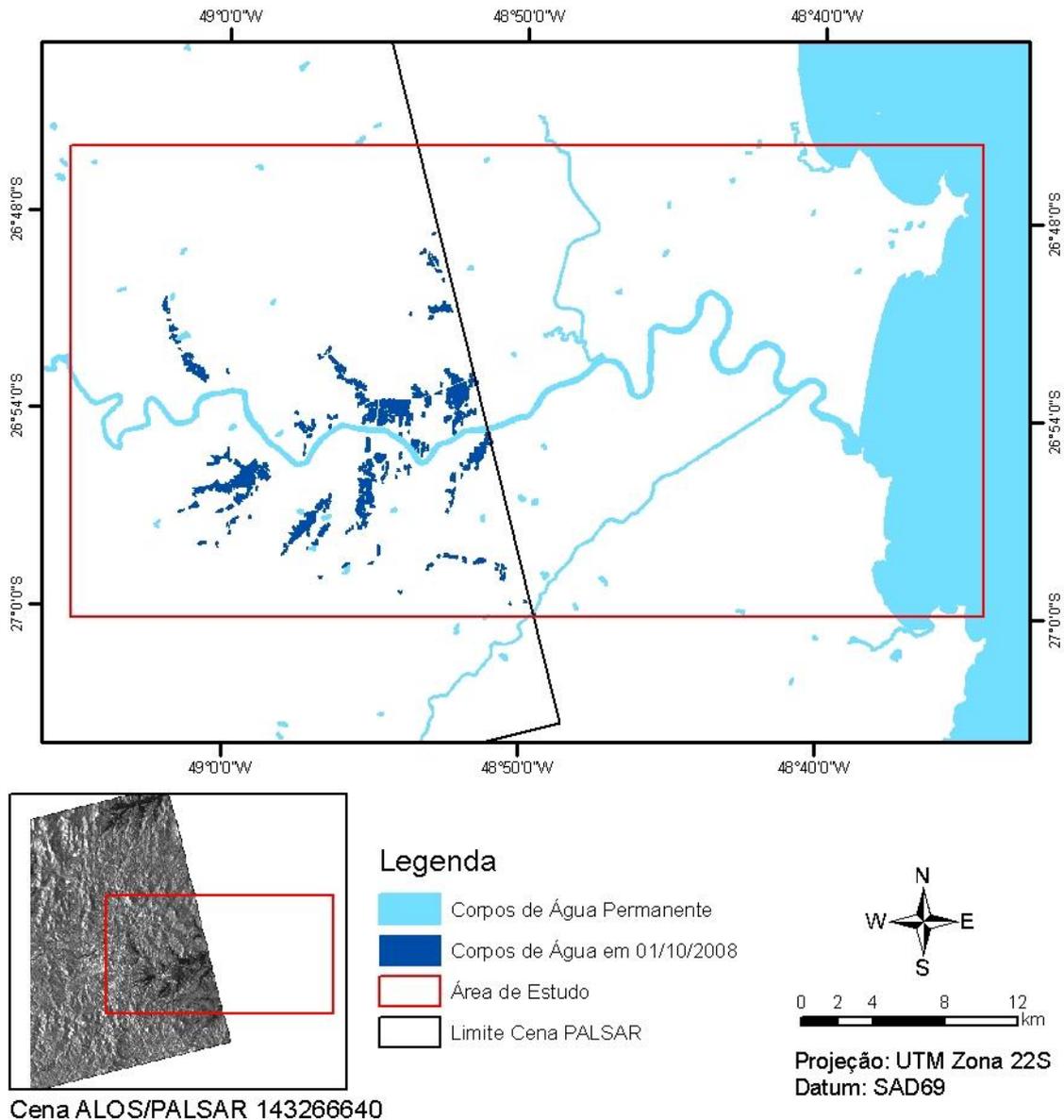


Figura 5.5 – Resultado da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR (polarização L-HH) de 01/10/2008.

Pelo fato destas duas cenas FBD/PALSAR não serem da mesma órbita-ponto, ou seja, não recobrirem totalmente a mesma área, foi realizado um mosaico dos resultados pós-classificados destas cenas. Deste modo foi possível a obtenção do mapa de corpo d'água pré-evento para a região do médio e baixo Vale do Itajaí, apresentado na Figura 5.6. Os corpos d'água permanentes, como por exemplo, o canal do rio Itajaí-açu, Itajaí

Mirim, Canal Luis Alves, foram extraídos dos dados planimétricos de escala 1:50.000 cedidos por GEOAMBIENTE e FATMA/PPMA-SC (2008).

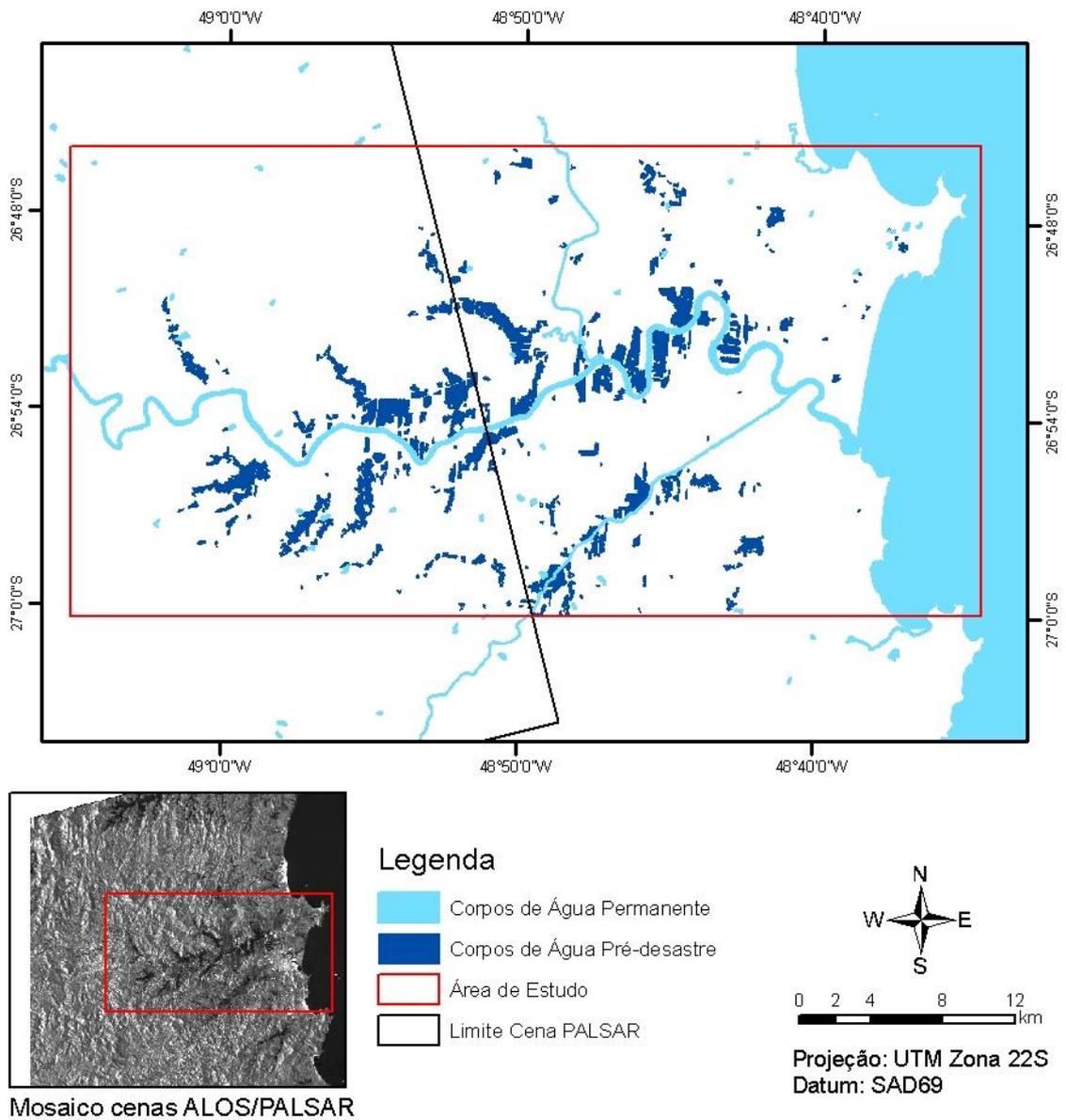


Figura 5.6 – Mapa de distribuição de corpos de água antes do desastre de 2008.

- **Imagens durante o evento**

As cenas adquiridas após as fortes chuvas dos dias 22 a 24 de novembro de 2008 corresponderam às imagens dos sensores ASAR, STD5/RST-2 e SM/TSX. As Figuras 5.6 a 5.10 apresentam os resultados de classificação das classes inundação e vegetação alagada.

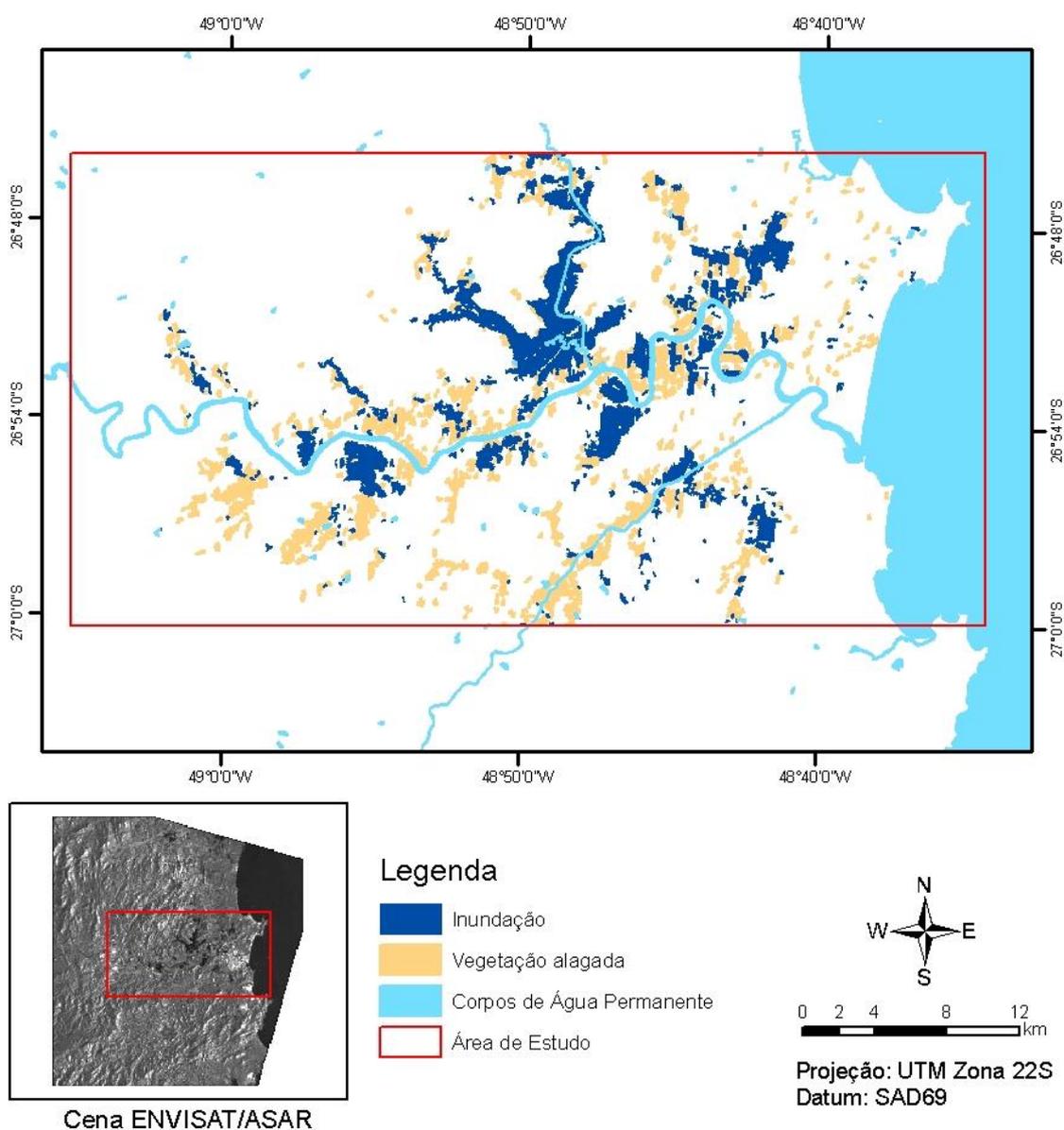


Figura 5.7 – Resultado da classificação da ortoimagem ASAR (polarização C-HH) de 27/11/2008.

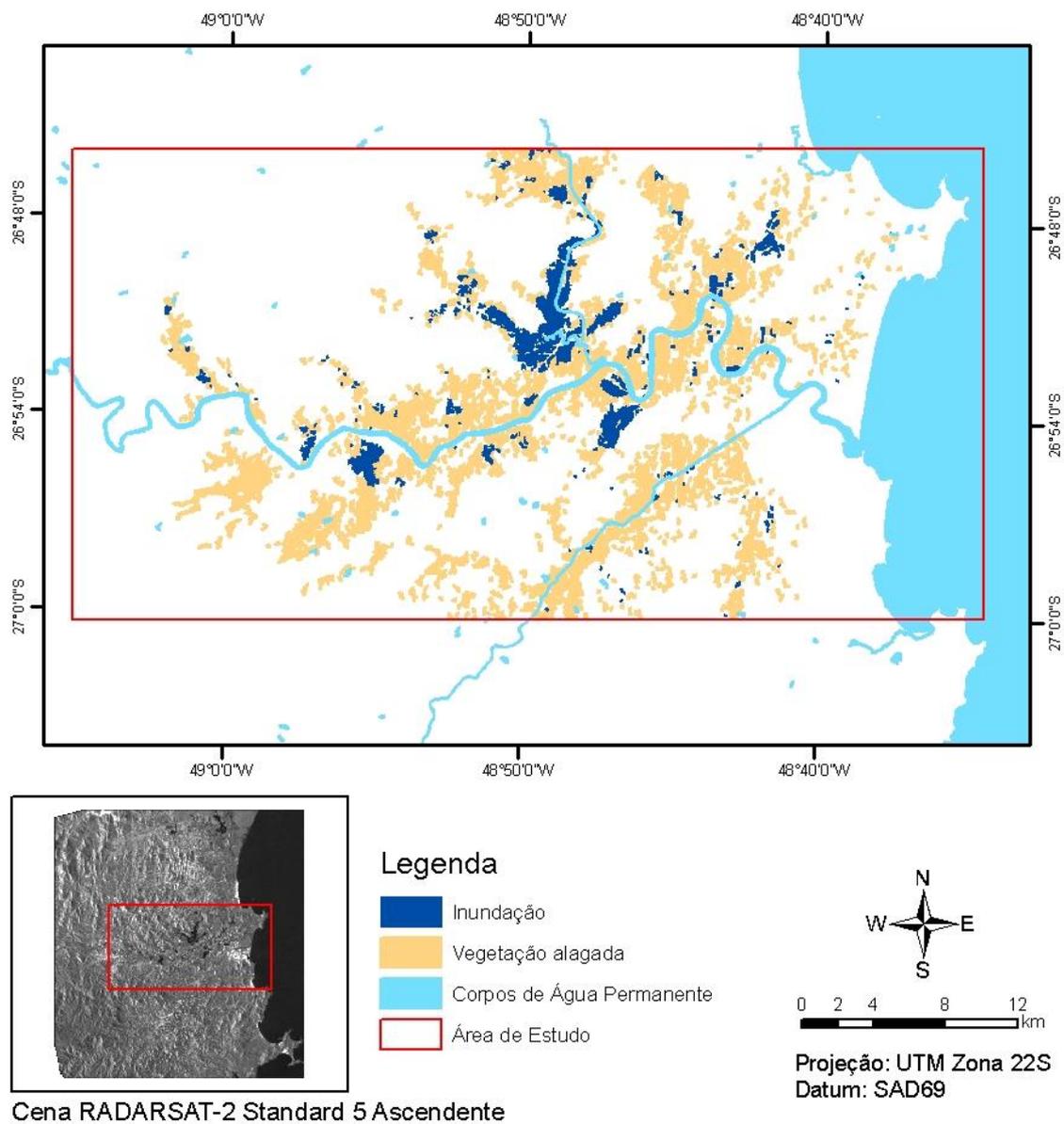


Figura 5.8 – Resultado da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 (polarização C-HH) de 28/11/2008.

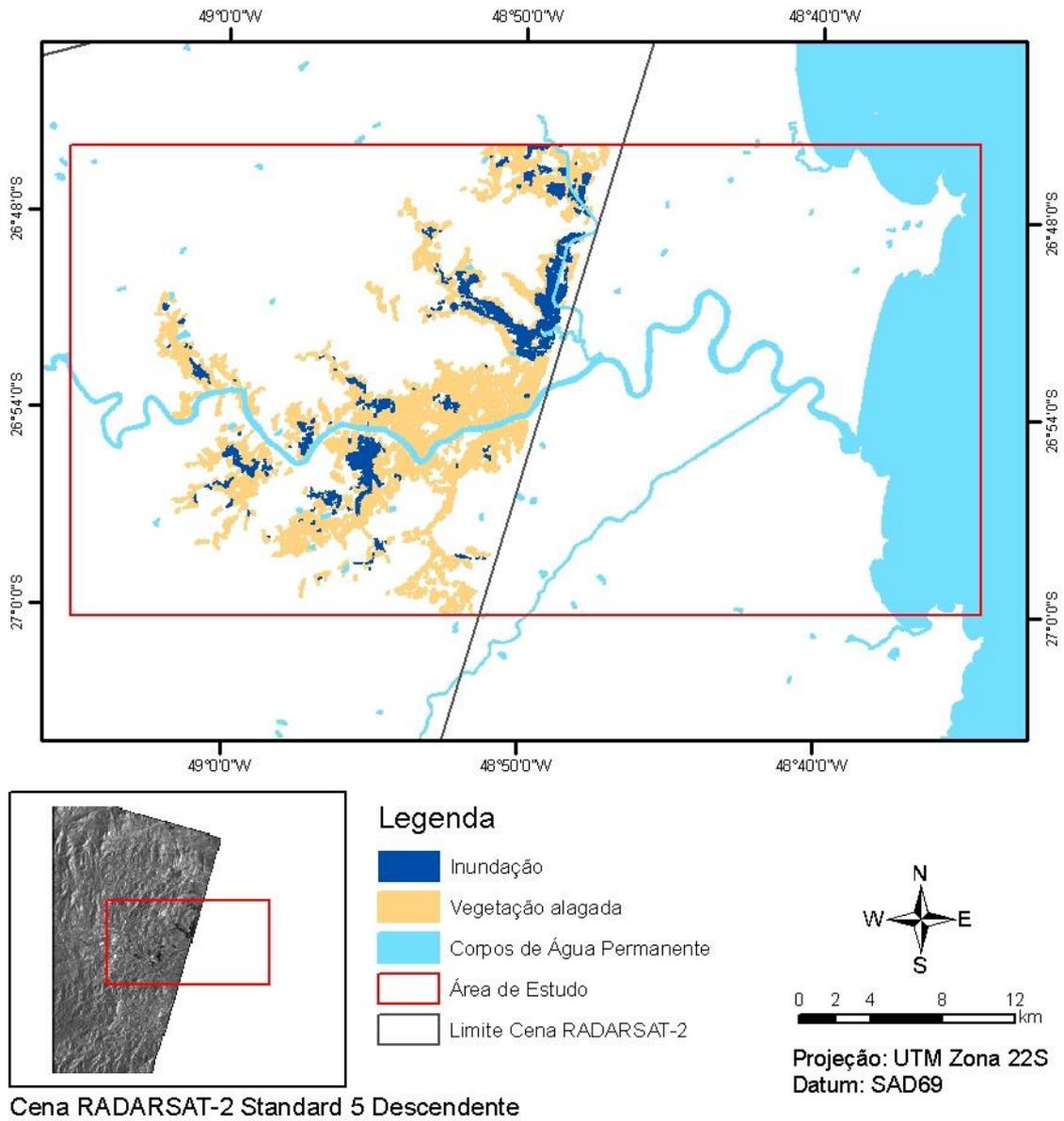


Figura 5.9 – Resultado da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 (polarização C-HH) de 30/11/2008.

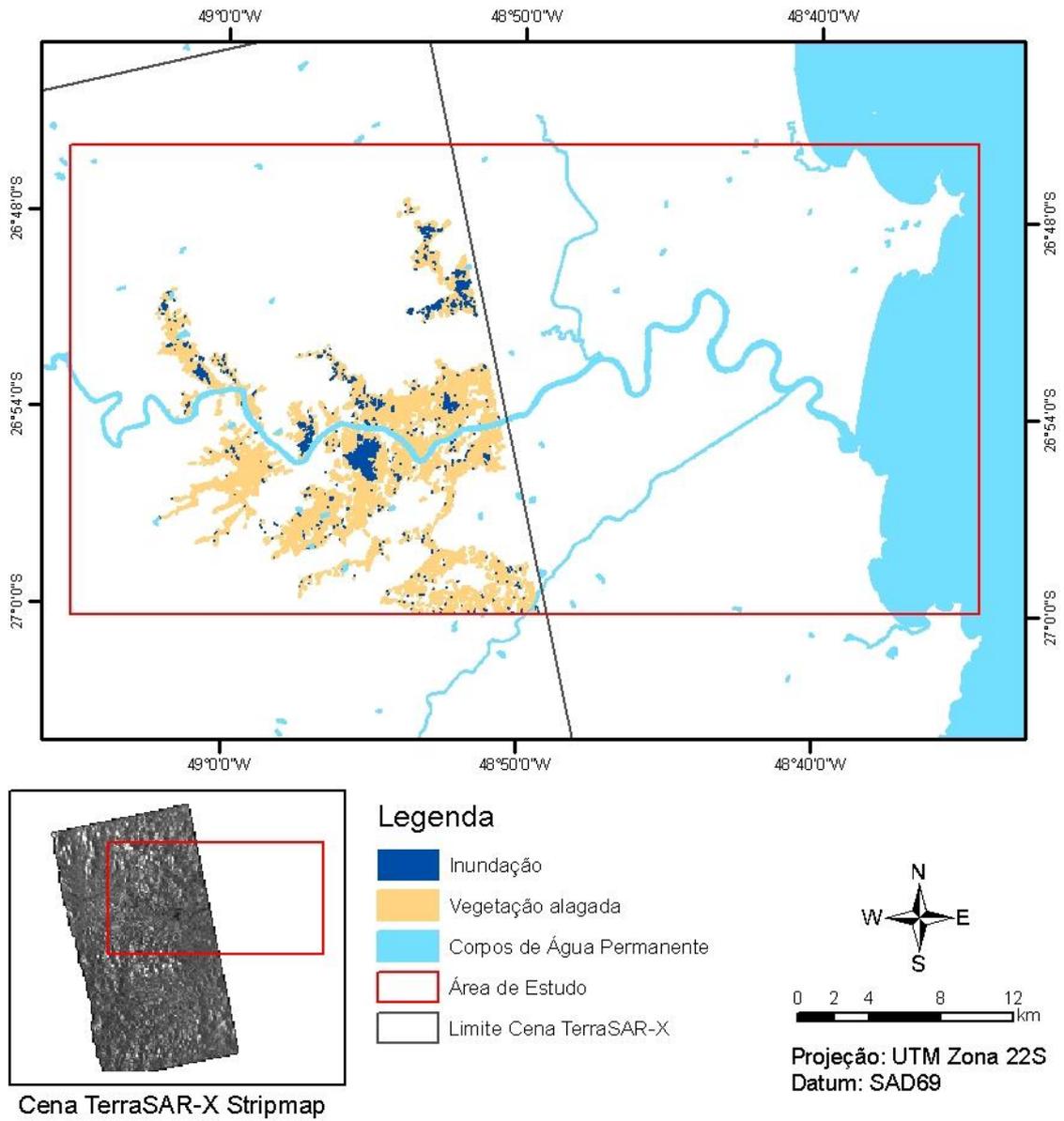


Figura 5.10 – Resultado da classificação da ortoimagem SM/TSX (polarização X-HH) de 01/12/2008.

- **Imagem após o evento de 2008.**

Uma cena do sensor PALSAR (polarização L-HH), com modo de aquisição FBS, foi adquirida 60 dias depois do desastre de novembro de 2008. Com esta ortoimagem do dia 30/01/2009 foi possível detectar alguns corpos d'água que permaneceram após o evento de fortes chuvas de 2008. Foi possível mapear também as áreas de vegetação alagada ao longo da planície do Vale do Itajaí, conforme apresentado na Figura 5.11.

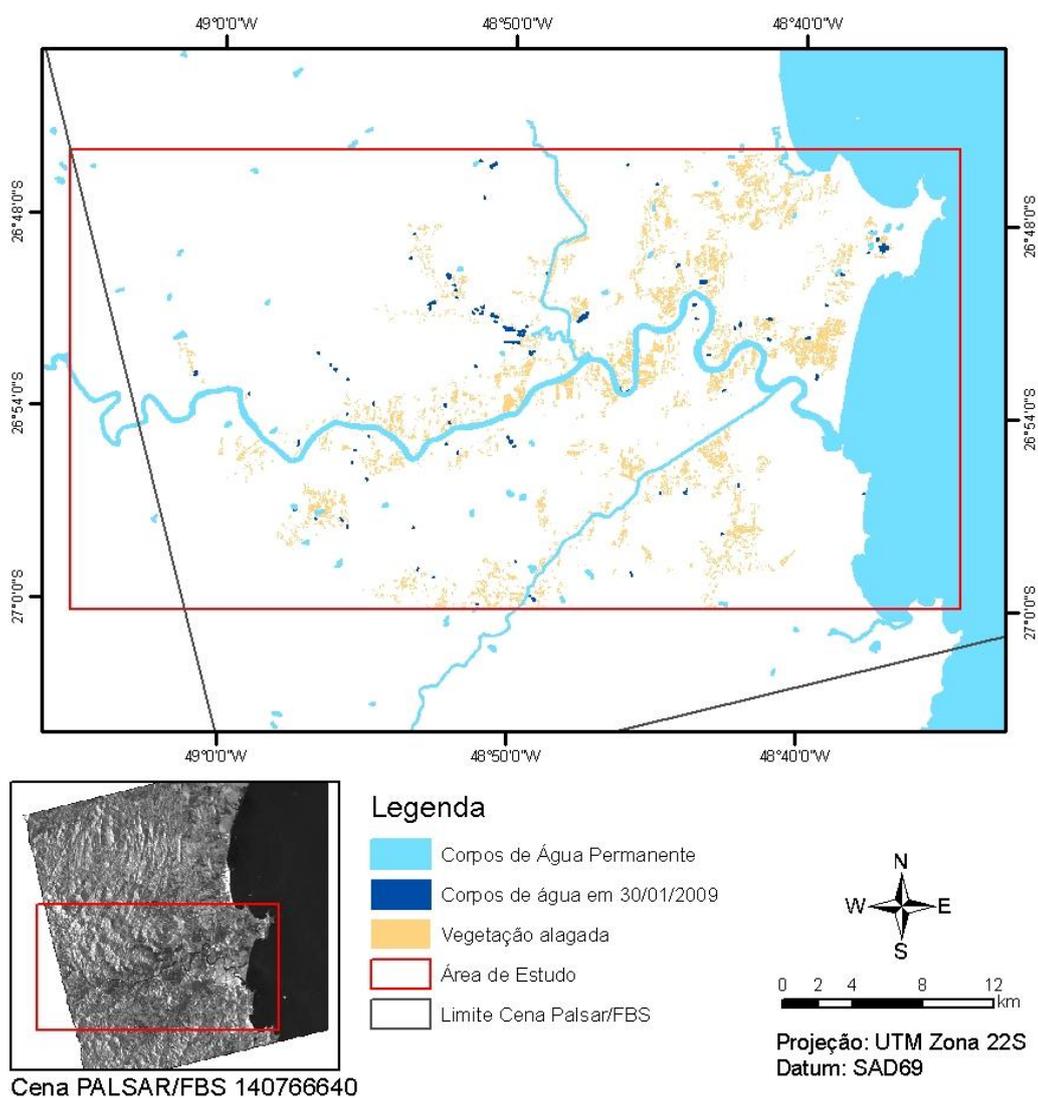


Figura 5.11 – Resultado da classificação da ortoimagem FBS/PALSAR (polarização L-HH) de 30/01/2009.

Na avaliação dos resultados das classificações, a acurácia global apresentou valores iguais ou superiores a 90% para todas as ortoimagens. Já o índice *kappa*, variou entre 0,77 a 0,88 conforme os dados apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Acurácia global e índice kappa para as classificações realizadas nas sete ortoimagens SAR.

ORTOIMAGEM	ACURÁCIA GLOBAL (%)	KAPPA	VARIÂNCIA DO KAPPA
FBD/PALSAR 14/09/2008	95	0,88	0,0026
FBD/PALSAR 01/10/2008	90	0,77	0,0044
ASAR	95	0,86	0,0032
STD5/RST-2 Ascendente	91	0,79	0,0028
STD5/RST-2 Descendente	92	0,80	0,0027
SM/TSX	90	0,78	0,0026
FBS/PALSAR	90	0,77	0,0023

Nas imagens FBD/PALSAR foram avaliadas apenas duas classes, corpos d'água e não água. O desempenho da classificação da imagem adquirida em setembro foi relativamente melhor do que a classificação da imagem com aquisição em outubro. Isto pode estar relacionado à maior confusão ocorrida na classificação de corpos d'água como não água na imagem adquirida em outubro, conforme pode ser observado nas matrizes de confusão destas classificações nas Tabelas B.1 e B.2 no Apêndice B.

Nas imagens adquiridas durante e posterior ao evento de 2008, foram avaliadas o resultado da classificação de três classes: água, não água e vegetação alagada. O melhor desempenho da exatidão global e do índice *kappa* foi observado na classificação da ortoimagem ASAR. As demais classificações (STD5/RST-2, SM/TSX e FBS/PALSAR) exibiram desempenhos dos índices *kappa* e exatidão globais muito próximos. As matrizes de confusão destas classificações podem ser consultadas nas Tabelas B.3 a B.7 no Apêndice B.

Os resultados da acurácia do produtor e do usuário são apresentados na Tabela 5.3. Os valores de exatidão do produtor mostram uma variação de 71% a 100% para a classe água, e de 79% a 94% para a classe vegetação alagada. Já os valores de acurácia do

usuário mostraram variações entre 73% e 100% em relação à classe água, e de 68% a 88% para a classe vegetação alagada.

Os maiores erros de omissão (relacionado à exatidão do produtor) para as classes água e vegetação ocorreram com as imagens STD-5 RST-2. Por outro lado, o maior erro de inclusão (relacionado à exatidão do usuário) na classe água foi observado para a imagem FBD PALSAR de 01/10/2008. Para a classe vegetação, a imagem STD-5 RST-2 ascendente apresentou o maior erro de inclusão (31%).

Tabela 5.3 – Exatidão do produtor e do usuário (%) para as classificações realizadas nas ortoimagens SAR.

ORTOIMAGEM	Exatidão do Produtor			Exatidão do Usuário		
	Água	Não Água	Vegetação Alagada	Água	Não Água	Vegetação Alagada
FBD/PALSAR 14/09/2008	100	93	-	85	100	-
FBD/PALSAR 01/10/2008	100	86	-	73	100	-
ASAR	100	79	84	85	79	97
STD5/RST-2 Ascendente	74	94	73	100	76	69
STD5/RST-2 Descendente	71	92	73	91	68	79
TSX	92	88	85	100	83	85
FBS/PALSAR	83	85	92	100	88	78

Em áreas de relevo plano ou levemente ondulado a extração de corpos d'água em imagens SAR pode ser obtida por meio de processos simples como, por exemplo, o fatiamento (*threshold*). No entanto, a aplicação deste tipo de processamento na área em estudo pode ocasionar graves erros de inclusão, conforme pode ser observado na Figura 5.12 onde a sombra de relevo sobre a face oeste do morro do Baú foi classificado como inundação.

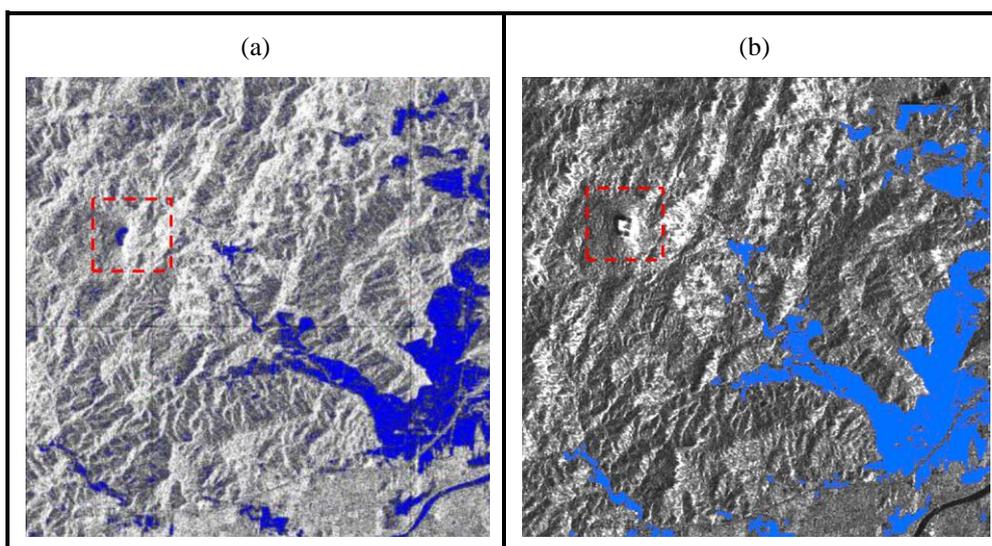


Figura 5.12 – Classificações de área inundada sobre a área de relevo montanhoso. (a) classificação da imagem ASAR não considerado o efeito de sombra de relevo. (b) classificação da mesma imagem considerando o efeito de sombra de relevo. Morro do Baú em destaque no polígono vermelho.

Com base nestas observações e nos valores da avaliação do desempenho das classificações, a abordagem metodológica aqui utilizada mostrou-se adequada para a realização do mapeamento de corpos d'água, áreas inundadas e de vegetação alagada sobre região do Vale do Itajaí.

#### 5.2.4. Inundação detectada no Vale do Itajaí

A integração dos dados de área inundada e de vegetação alagada derivados das diferentes imagens SAR, adquiridas entre o período de 27 de novembro a 01 de dezembro de 2008, permitiu elaborar um mapa com a distribuição das áreas que foram inundadas devido as fortes chuvas na região do médio e baixo vale do rio Itajaí, apresentado na Figura 5.13.

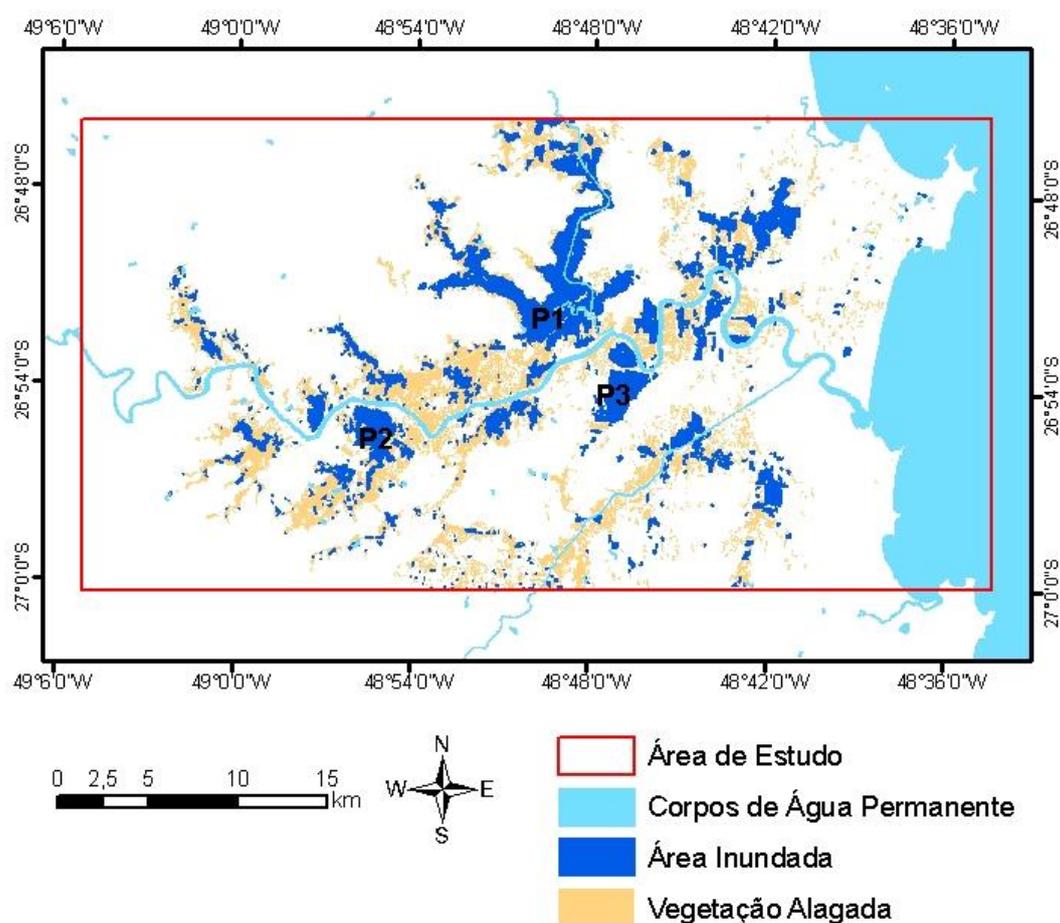


Figura 5.13 – Mapa de áreas inundadas e de vegetação alagada detectada pelos diferentes sensores SAR durante o período de 27/11 a 01/12/2008.

As manchas de inundação mapeadas ocorreram ao longo das planícies do médio e baixo Vale do Itajaí, localizadas tanto na margem direita como na margem esquerda do rio Itajaí-açu. Foi possível observar na primeira imagem adquirida posterior às fortes chuvas (ASAR), um possível ponto de extravasamento da massa d'água do canal principal do Rio Itajaí-açu para áreas adjacentes. Isto ocorreu sobre um trecho meândrico do rio, próximo às cidades de Itajaí e Navegantes, como pode ser observado na Figura 5.14. Na classificação da ortoimagem STD5/RST-2 do dia 28 de novembro (Figura 5.8), esta mesma mancha de inundação foi detectada, porém com menor dimensão da massa d'água. A fotografia de campo obtida por sobrevoio (Figura 5.15) mostra a permanência da massa d'água no dia 02 de dezembro de 2008.

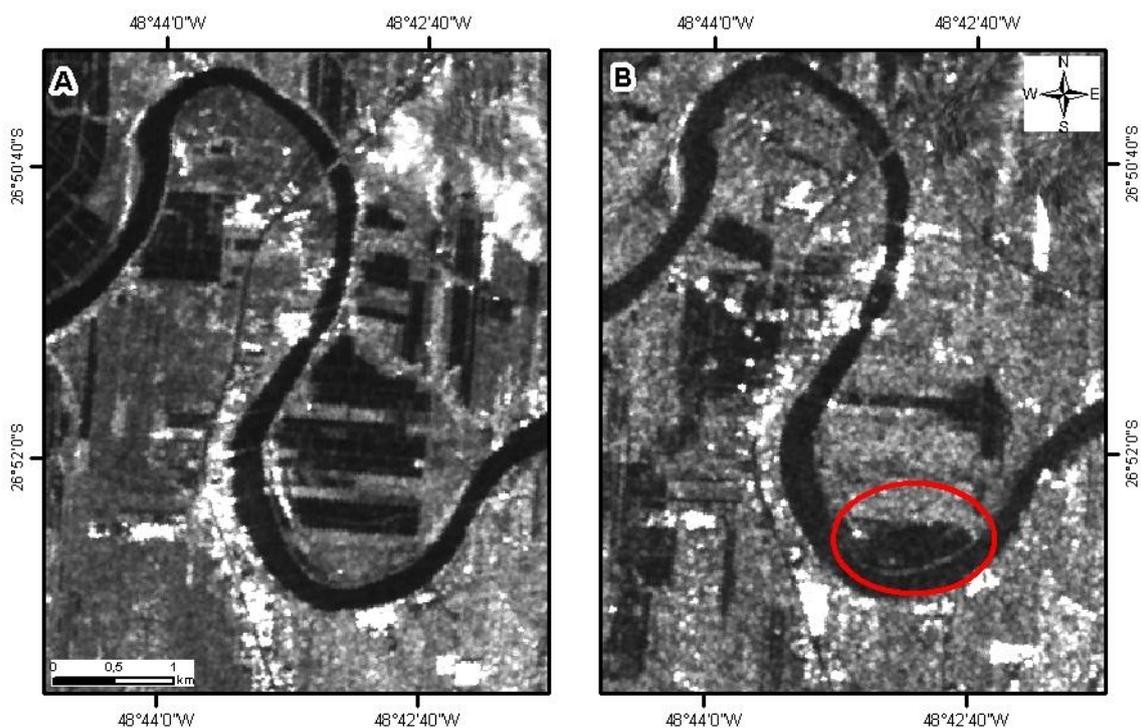


Figura 5.14 Área inundada próxima ao canal do Rio Itajaí-açu (polígono vermelho). A) Imagem FBD/PALSAR do dia 15 de setembro de 2008, B) Imagem ASAR do dia 27/11/2008.



Figura 5.15 Fotografia da área inundada próxima ao canal do Rio Itajaí-açu.

Foto: Joel Pellerin 02/12/2008.

A maior mancha de inundação detectada ocorreu na planície do baixo curso do Rio Luis Alves (P1 na Figura 5.13), sendo observada sua permanência nos dias 27/11/2008 (ASAR), 28/11/2008 (RADARSAT-2 Ascendente) e parcialmente na imagem do dia 30/11/2008 (RADARSAT-2 Descendente). Na margem direita do rio Itajaí-açu, destaca-se também a dimensão de duas manchas de inundação, uma sobre a região de Gaspar (P2 na Figura 5.13) e outra sobre a região do Córrego Espinheiro (P3 na Figura 5.13) no município de Ilhota.

Foi detectada pelos diferentes sensores SAR uma área de aproximadamente 69.056 km<sup>2</sup> de terrenos cobertos por água, ao longo do período de 27 de novembro a 01 de dezembro de 2008. Por meio das imagens FBD/PALSAR, com data de aquisição anterior ao evento de 2008, foram estimados 51.278 km<sup>2</sup> de terrenos cobertos por água, referentes aos diques de arroz irrigados (Figura 5.6). Deste modo, foi possível observar que houve um acréscimo de 17.778 km<sup>2</sup> de áreas afetadas por inundações, resultado da expansão das manchas de inundação sobre a área em estudo.

Além das condições meteorológicas que propiciaram o desastre desta magnitude, as condições naturais do ambiente como relevo, declividade, tipo de uso e cobertura do solo podem ter potencializado o evento (TACHINI, 2009). Segundo os dados de uso do

solo e cobertura da vegetação, 91% destas áreas afetadas pela inundação são destinadas para fins agrícolas e 7,5% são áreas de pastagens ou de campos naturais (GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC, 2008). De forma geral, estas áreas afetadas possuíam grande parte de seu uso do solo com predomínio para o cultivo de arroz irrigado, sobre terrenos planos e de baixa declividade. Com o advento da inundação causado pela grande quantidade de chuva, as manchas de inundação ultrapassaram os diques de arroz irrigados, que se expandiram para áreas de relevo suavemente ondulado. Desta forma, foi observado que o relevo muito plano da região, a prática da rizicultura em conjunto com eventos de fortes chuvas, torna a área de planície do rio Itajaí-açu, à jusante da cidade de Blumenau, uma área bastante vulnerável a eventos de inundações.

#### **5.2.5. Dinâmica temporal da inundação sobre a região de Gaspar**

Através da análise do conjunto de imagens adquiridas em diferentes períodos (antes, durante e posterior da inundação) foi elaborado um mapa com a representação da variabilidade das manchas de inundação e de áreas com vegetação alagada sobre a região localizada entre o Ribeirão Gaspar e Ribeirão Poço Grande, no município de Gaspar. Na Figura 5.16 é apresentada esta sequência temporal, resultado da classificação das diferentes ortoimagens SAR.

Na Figura 5.16(a) são apresentados os dados extraídos da imagem FBD/PALSAR, com data de aquisição antes do evento de 2008. Da análise destes dados, é possível ter uma visualização da distribuição dos principais corpos d'água antes das fortes chuvas de novembro de 2008.

Durante o período do desastre, quatro imagens foram adquiridas em dias diferentes. A primeira imagem posterior às fortes chuvas corresponde à cena ASAR (Figura 5.16b) do dia 27 de novembro. Esta imagem evidencia as manchas de inundação resultante de um acumulado superior a 580 mm de precipitação registrada na estação pluviométrica de Blumenau, entre os dias 22 a 27 de novembro de 2008, período do início da

situação de emergência e da aquisição da imagem ASAR. Na Figura 5.16b destaca-se também a grande mancha de inundação localizada na planície da margem direita do Rio Itajaí-açu, a leste da cidade de Gaspar. Nota-se do mesmo modo, a disposição das áreas de vegetação alagada sobre áreas que na Figura 5.16a correspondem aos diques de arroz irrigado.

No dia 28 de novembro, foi adquirida a primeira imagem RADARSAT-2 com visada ascendente (Figura 5.16c). Entre o período de aquisição da imagem ASAR (Figura 5.16b) e esta imagem RADARSAT-2, houve redução das chuvas, sendo registrado um acumulado de 13 mm de precipitação. Pode-se perceber a redução das manchas de inundação e um aumento das áreas de vegetação alagada, o que pode estar relacionado ao escoamento das águas.

A imagem seguinte, RADARSAT-2 com visada descendente (Figura 5.16d) foi obtida no dia 30 de novembro. Entre o período da imagem anterior (Figura 5.16c) e a aquisição desta imagem houve um aumento na precipitação, onde foram registrados 82 mm. Nesta imagem pode-se observar que algumas manchas de inundação expandiram-se sobre áreas de vegetação alagada e outras manchas de inundação menores apareceram, o que evidencia o alto grau de saturação do solo, com pouca capacidade de escoamento do terreno após esta chuva de 82 mm.

A última imagem do período de desastre corresponde a cena do satélite TerraSAR-X, modo Stripmap, com data de aquisição de 01 de dezembro de 2008, nove dias após o início da situação de emergência (Figura 5.13e). A quantidade de chuva registrada entre o período da imagem anterior (Figura 5.13d) e esta imagem foi de 0,5 mm. Pode ser observada assim uma redução da grande mancha de inundação na margem direita do Rio Itajaí-açu e a permanência de outras de menor dimensão.

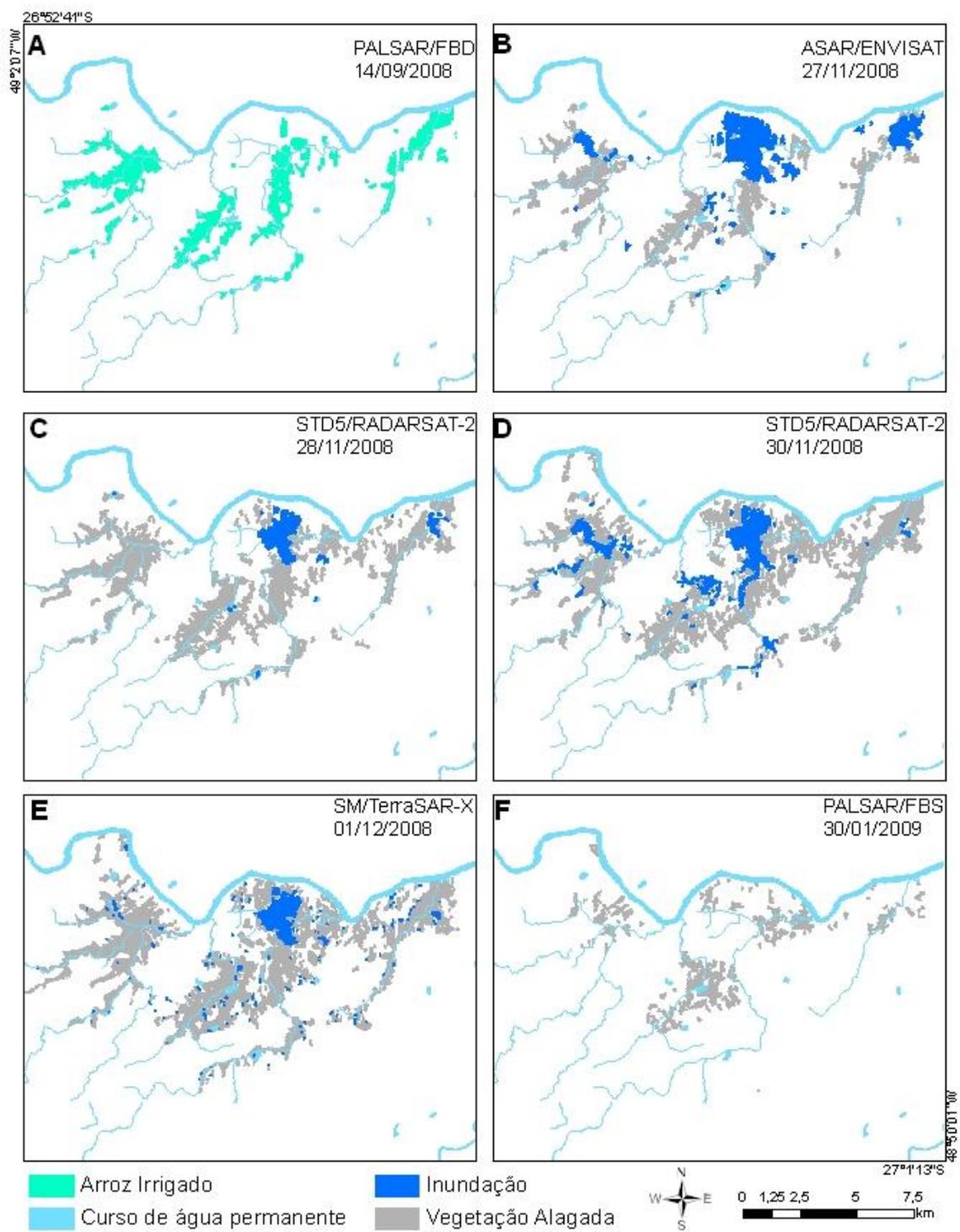


Figura 5.16 – Sequência temporal dos corpos d'água e de vegetação alagada, detectados pelos diferentes sensores SAR.

A imagem posterior ao período do desastre de 2008 corresponde a uma cena do sensor PALSAR, modo FBS, adquirida no dia 30 de janeiro de 2009 (Figura 5.16f). O tempo decorrido entre a última imagem do período de desastre (Figura 5.16e) e a aquisição desta cena foi de 60 dias, não sendo registradas fortes chuvas durante este intervalo. Nesta imagem é possível notar a ausência de corpos de água, tanto sobre os diques de arroz irrigado, como sobre as áreas inundadas detectadas na Figura 5.16b, Figura 5.16c, Figura 5.16d e Figura 5.16e. A vegetação alagada corresponde aos campos de arroz irrigado remanescente ao desastre de 2008, já em fase de colheita.

Com as imagens adquiridas durante o período de desastre, foi possível dimensionar a variabilidade espacial das manchas de inundação e de vegetação alagada em função da quantidade de chuva. Os gráficos da Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam os valores de precipitação acumulada, de área inundada e de vegetação alagada entre os dias 22 de novembro a 01 de dezembro de 2008 sobre esta região. Foi observado que esta variação no tamanho das manchas de inundação ao longo do período de desastre tem uma clara vinculação com a variação no volume de chuvas sobre a região.

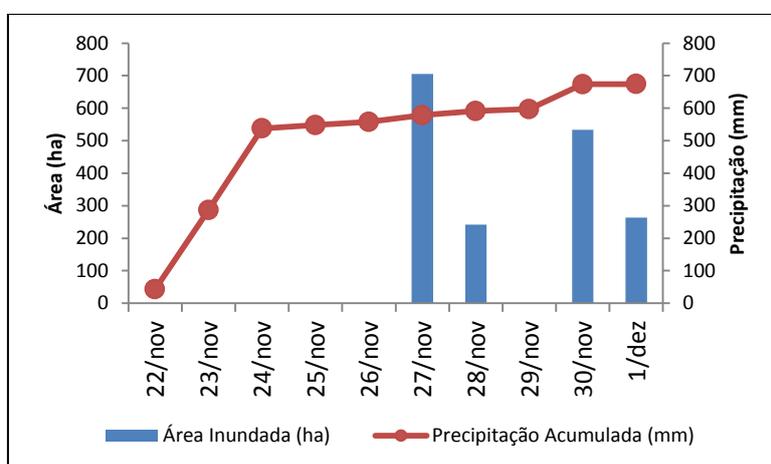


Figura 5.17 – Área ocupada por manchas de inundação detectada pelos diferentes sensores SAR e quantidade de chuva acumulada.

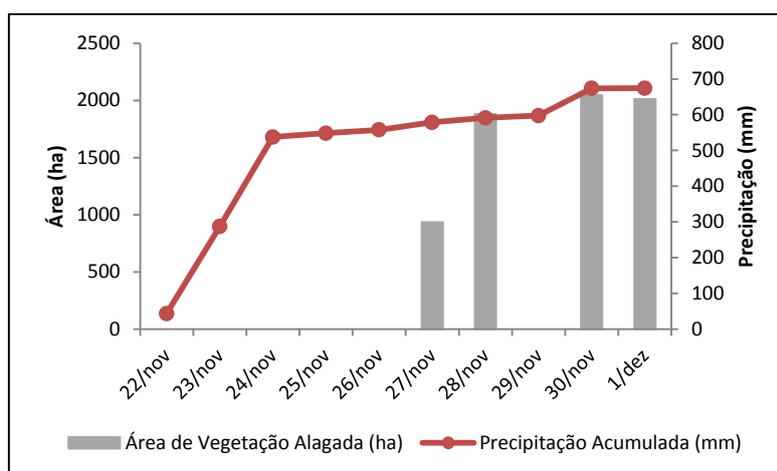


Figura 5.18 – Área ocupada por vegetação alagada detectada pelos diferentes sensores SAR e quantidade de chuva acumulada.

Como se pode perceber no gráfico da Figura 5.17 e Figura 5.18, a maior área inundada foi detectada pela imagem do dia 27 de novembro (ASAR), com três dias de aquisição após o pico das fortes chuvas. No dia seguinte, houve uma redução significativa no tamanho de áreas inundadas, e com um aumento no tamanho de áreas de vegetação alagada, fato que pode estar relacionado ao processo de escoamento da inundação.

No terceiro dia de aquisição de imagem SAR (30/11/2008), houve um aumento no volume de chuva, ocasionando assim um aumento de áreas inundadas e de vegetação alagada, conforme pode ser observado na Figura 5.16d. Na última imagem SAR adquirida sete dias após as fortes chuvas (01/12/2008), a área inundada volta a reduzir, não ocorrendo o mesmo com a área de vegetação alagada. Estes resultados destacam a grande sensibilidade de sensores SAR na detecção e monitoramento de áreas inundadas e de vegetação alagada, resultado de eventos de fortes chuvas.

### 5.3. Mapeamento das cicatrizes de deslizamentos de terra

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos no processo de interpretação de cicatrizes de deslizamentos de terra sobre a ortoimagem SM/TSX. Considerações sobre a aparência de cicatrizes em imagem SAR de alta resolução espacial, a influência dos parâmetros do alvo e do sensor e sobre o ambiente afetado são realizadas ao longo desta seção.

#### 5.3.1. Detecção de cicatrizes de deslizamentos na imagem TerraSAR-X

Primeiramente são apresentados neste item os resultados referentes à etapa de pré-processamento da imagem SM/TSX, que correspondeu à operação de filtragem (ruído *speckle*) e correção geométrica (ortorretificação), demonstrados na Figura 5.19 e a Figura 5.20.

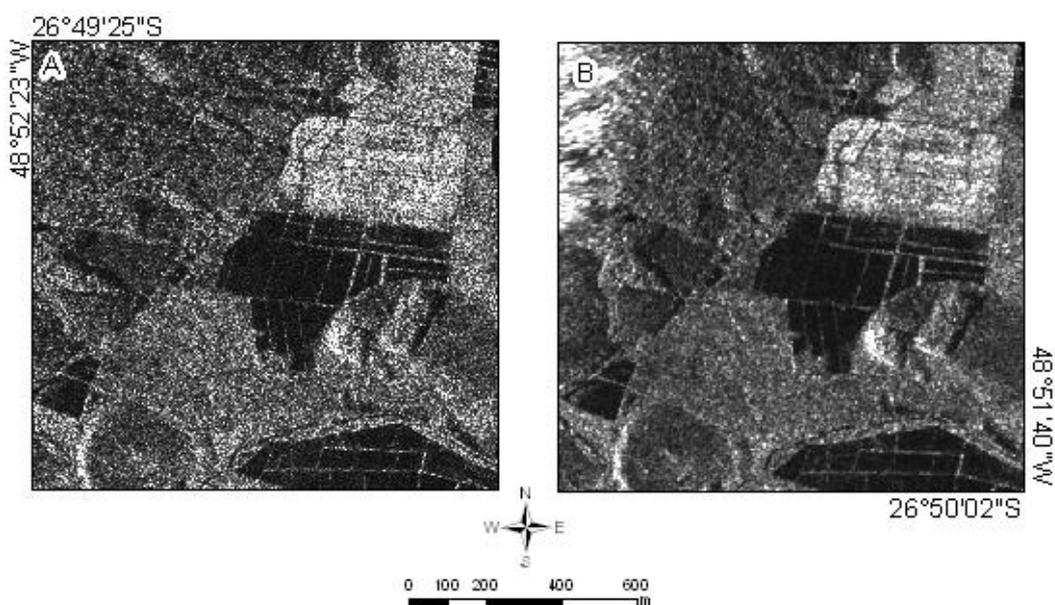


Figura 5.19 – Detalhe do resultado da operação de filtragem do ruído *speckle*. A) imagem TSX não filtrada e não ortorretificada, B) imagem TSX filtrada e ortorretificada.

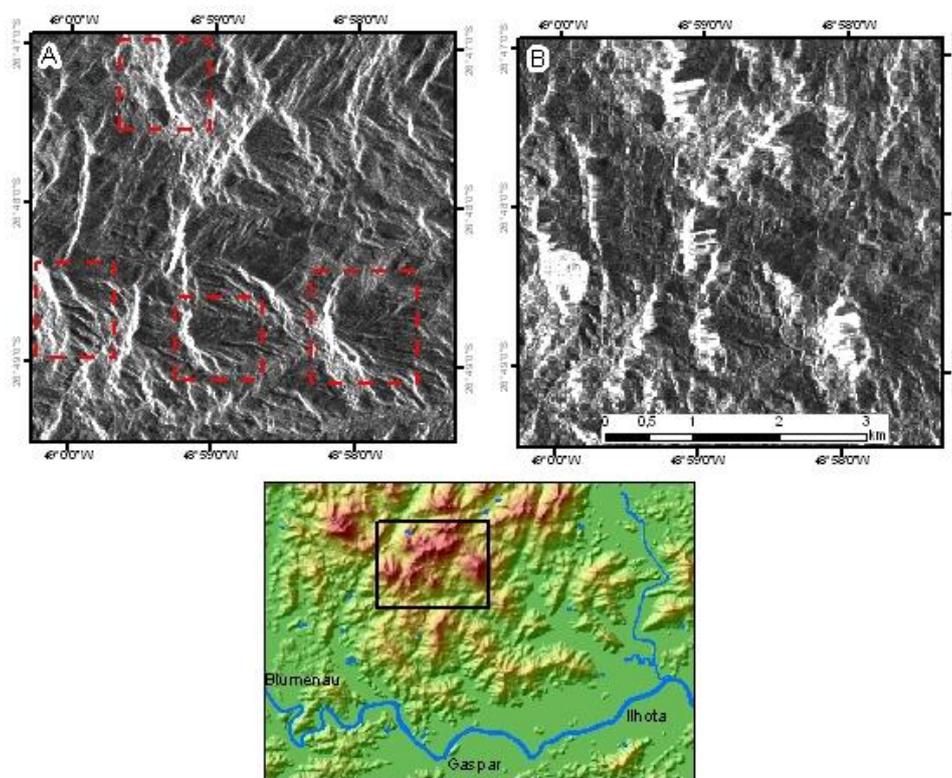


Figura 5.20 – Detalhe do resultado do processo de ortorretificação. A) imagem não ortorretificada, B) imagem ortorretificada. Em vermelho, exemplos de vertentes afetadas por *foreshortening* sobre a região do Morro do Baú.

O processo de filtragem para redução do ruído *speckle* permitiu uma maior homogeneização dos alvos da ortoimagem SM/TSX, que em conjunto com o processo de ortorretificação, possibilitou um melhor desempenho na etapa de interpretação visual. Devido à incidência média de  $28,7^\circ$  de aquisição da imagem SM/TSX, a área em estudo foi intensamente afetada por distorções geométricas do tipo *layover* e *foreshortening*. Como pode ser observado na Figura 5.20, a ortorretificação ocasionou uma alteração significativa da imagem SM/TSX reduzindo as distorções, principalmente sobre as áreas de vertentes. Em contrapartida, extensos setores mostraram saturação de respostas (elevado brilho) em rampas frontais ao apontamento da antena do SAR. Neste sentido, somente as vertentes não afetadas por estas distorções puderam ser analisadas.

Conforme dito anteriormente, a análise visual foi realizada de modo monoscópico, com o realce por ampliação linear do contraste em conjunto com o recurso de visão em perspectiva (3D) obtida por meio da sobreposição da ortoimagem SM/TSX sobre o DEM (Figura 5.21).

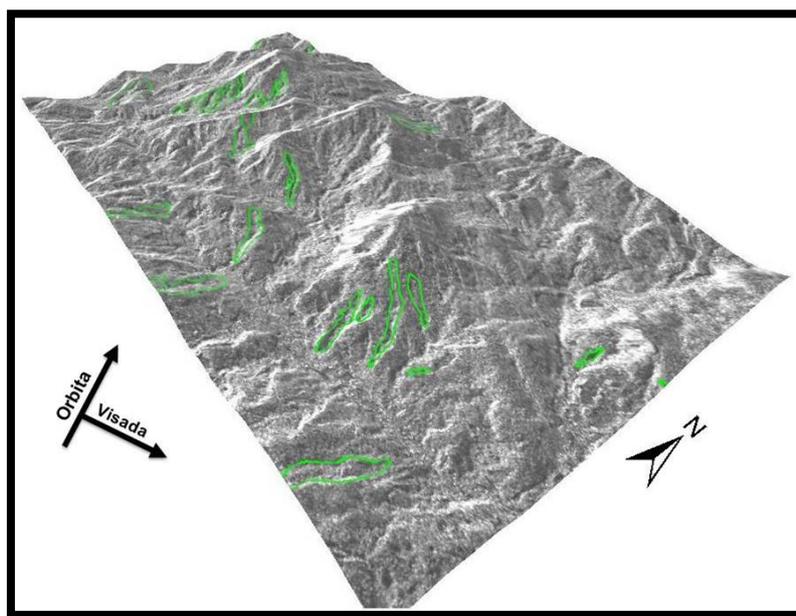


Figura 5.21 – Visualização em perspectiva da ortoimagem SM/TSX sobreposta sobre o DEM. Exagero vertical de 1,25. Polígonos em verde: algumas cicatrizes de deslizamento.

Características como forma, tonalidade e o contraste entre material movimentado e não movimentado permitiram a identificação da presença destes alvos na ortoimagem SM/TSX. Estas características são discutidas a seguir, tomando como referência duas cicatrizes de escorregamento e suas respectivas fotografias de sobrevoos na região (Figura 5.22 e Figura 5.23). Para um melhor entendimento e visualização de cada cicatriz analisada, é apresentada a ortoimagem SM/TSX com orientação para o norte geográfico e uma indicação da cicatriz de deslizamento sobre a vertente. Foram mostradas também estas cicatrizes com orientação em perspectiva para representar a mesma direção de visada da fotografia de campo, conforme as figuras apresentadas a seguir.

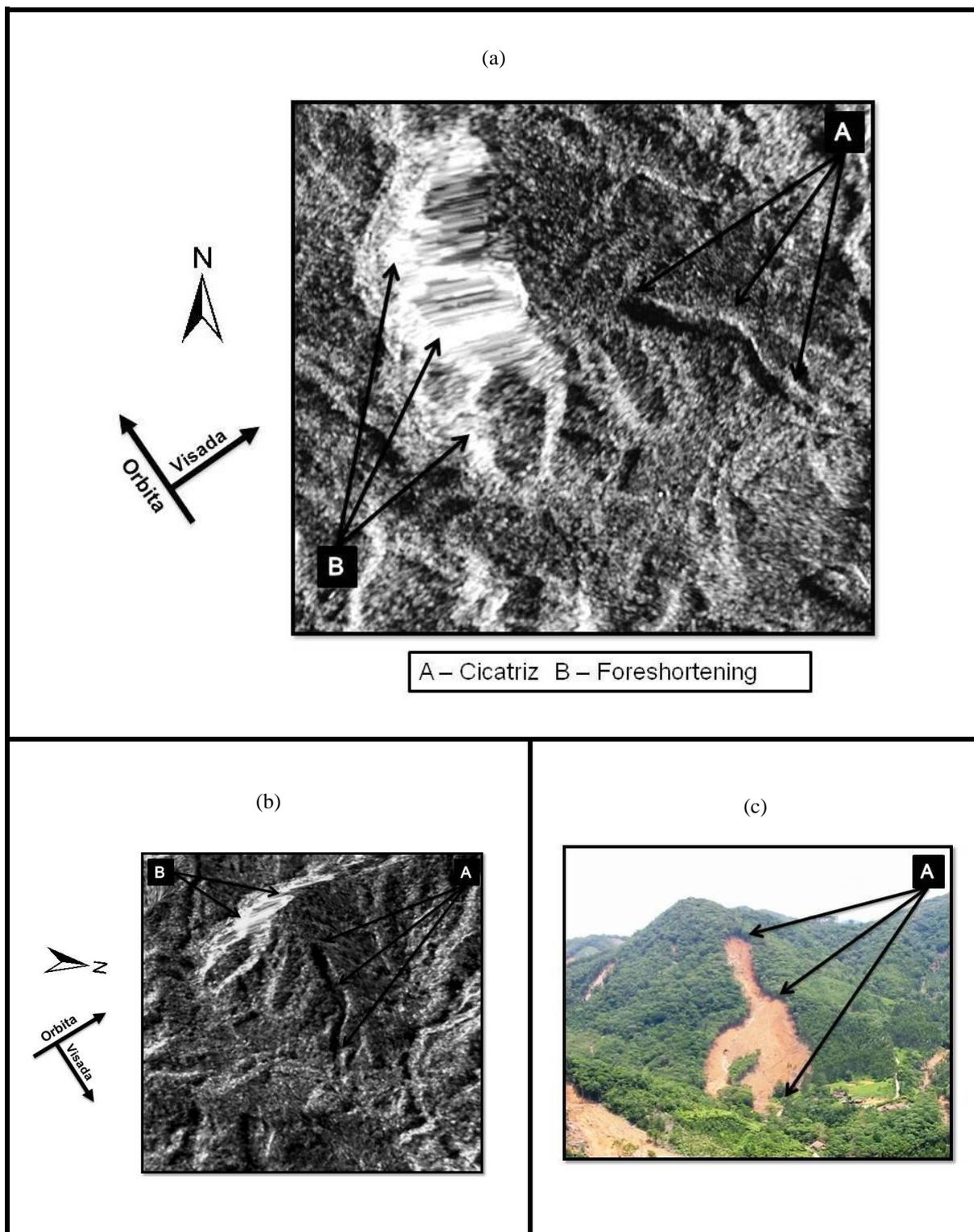


Figura 5.22 – Cicatriz de deslizamento #1. (a) Ortoimagem SM/TSX com orientação para o norte geográfico; (b) Ortoimagem SM/TSX com visão em perspectiva, exagero vertical de 1,25; (c) Fotografia de campo: Joel Pellerin (15/01/2009).

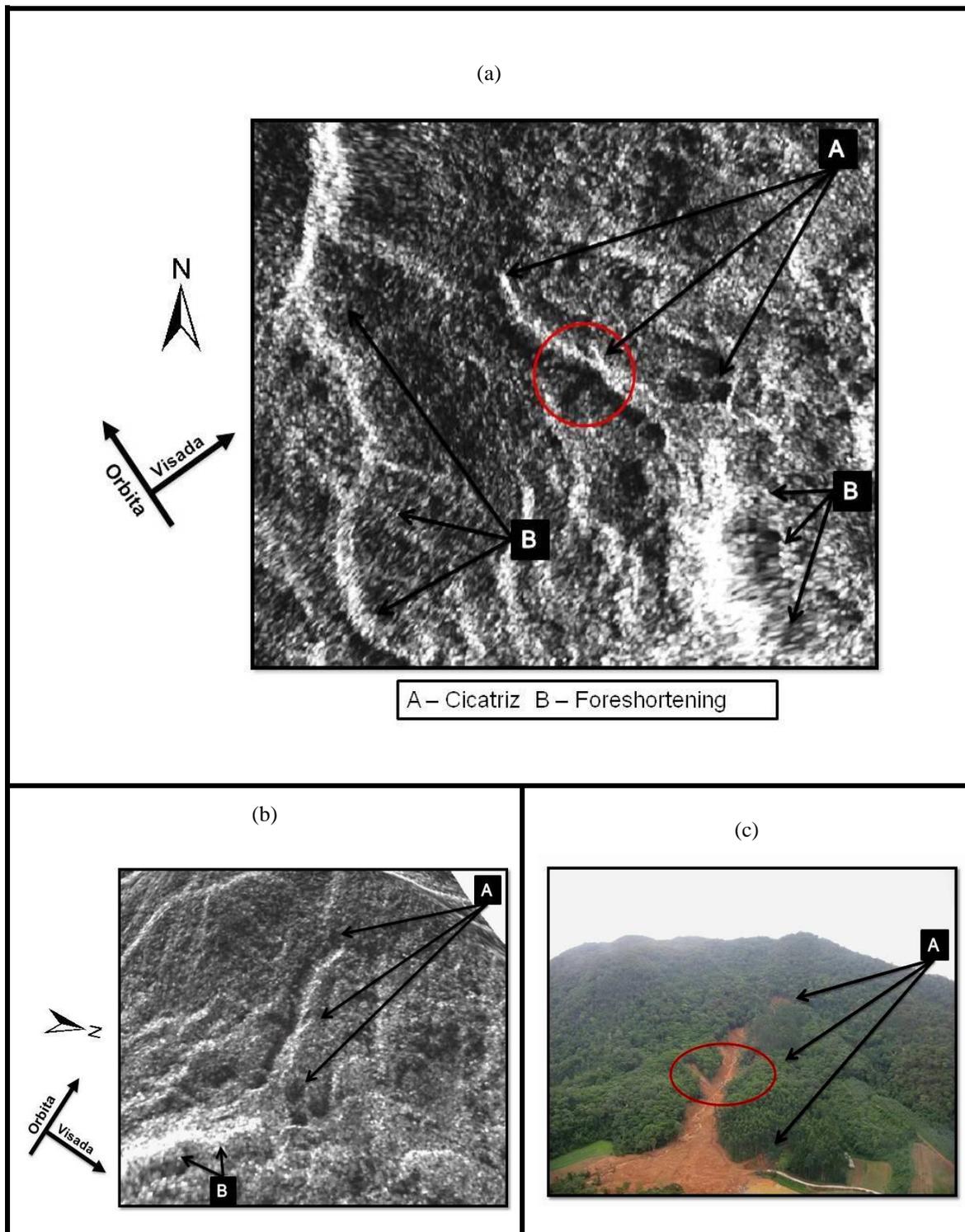


Figura 5.23 – Cicatriz de deslizamento #2. (a) Ortoimagem SM/TSX com orientação para o norte geográfico; (b) Ortoimagem SM/TSX com visão em perspectiva, exagero vertical de 1,25; (c) Fotografia de campo: Joel Pellerin (02/12/2008).

A cicatriz de deslizamento #1 (Figura 5.22) ocorreu na localidade conhecida como Tifa da Galdina, na região do Alto do Baú. O comprimento da cicatriz é aproximadamente 470 metros, com uma altura de 180 metros (desnível topo-base da vertente) e direção de movimento NW – SE. A cicatriz de deslizamento #2, mostrada na Figura 5.23, ocorreu na região do Braço do Serafim. Também apresenta direção de movimento principal no sentido NW – SE, com comprimento de 510 metros e altura aproximada de 160 metros.

Os principais atributos destas duas cicatrizes de escorregamento notados na ortoimagem SM/TSX foram a forma estreita e a tonalidade escura da área movimentada. A tonalidade escura corresponde ao baixo retroespalhamento do interior desta cicatriz, característica de resposta de superfícies lisas (solo exposto) ao comprimento de onda emitido pelo sensor ( $\lambda = 3$  cm). No sentido do topo para a base da vertente, predominou a forma estreita das cicatrizes.

A cicatriz #2 (Figura 5.23) apresenta o mesmo padrão de resposta da cicatriz #1 (Figura 5.22), tonalidade escura e forma estreita, alongando-se em direção à base da vertente. É possível notar dois deslizamentos secundários de menor dimensão, com direção ortogonal ao sentido principal de movimento desta cicatriz, destacado pelo círculo em vermelho na Figura 5.23a. Enfatiza-se aqui a capacidade da imagem SM/TSX em detectar estas pequenas feições de deslizamentos.

A presença de uma densa cobertura florestal nas vertentes analisadas permitiu observar o contraste da resposta entre área movimentada e não movimentada. Isto foi verificado no terreno (fotos de campo) e através de comparação com imagens ópticas de alta resolução espacial, com imageamento posterior ao evento de 2008, conforme exemplo apresentado na Figura 5.24.

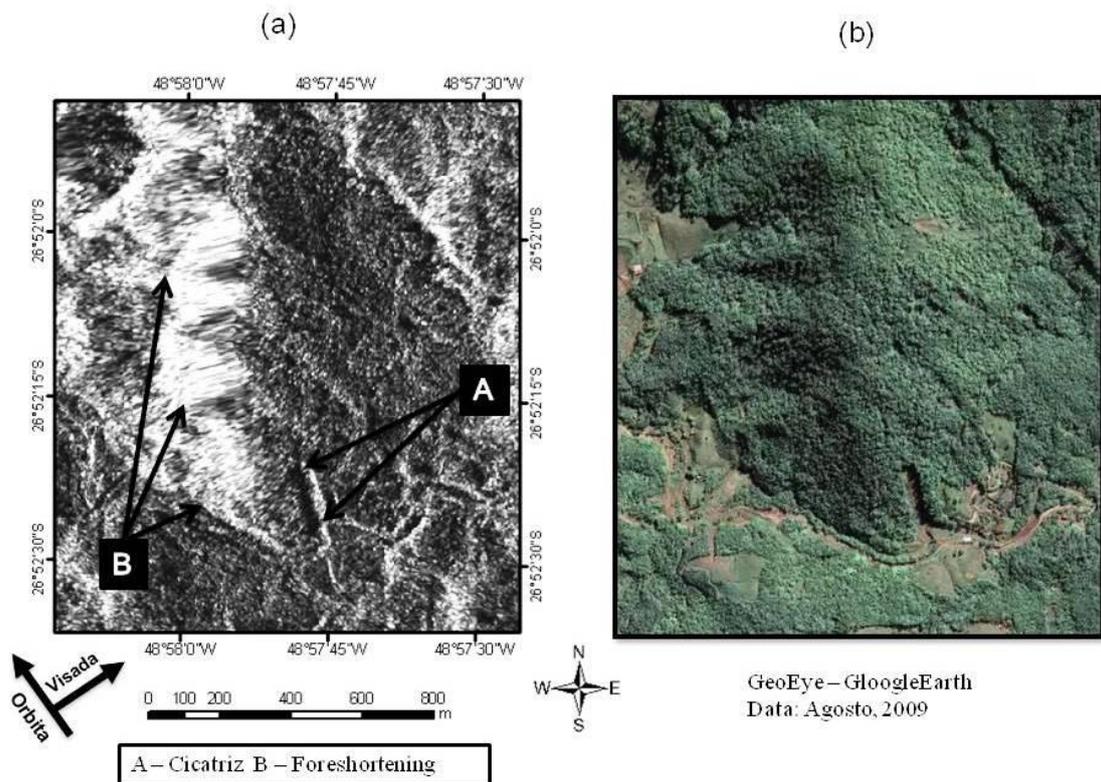


Figura 5.24 – Contraste entre área movimentada e não movimentada. (a) Cicatriz de deslizamento sobre ortomagem SM/TSX. (b) Imagem óptica de alta resolução espacial sobre área correspondente.

Algumas destas cicatrizes apresentaram grandes dimensões quanto ao comprimento e altura. A maior cicatriz de escorregamento observada ocorreu sobre a estrada de Luis Alves, com um comprimento de mais de 1.100 metros de movimento, sobre uma vertente com 280 metros de altura (Figura 5.25). Apesar da direção de movimento desta cicatriz ter ocorrido no sentido SE – NW, e com isso estar sobre a face da vertente fortemente afetada por distorções geométricas, alguns dos atributos apresentado no modelo fotointerpretativo como forma, cor e textura puderam ser identificados sobre esta cicatriz.

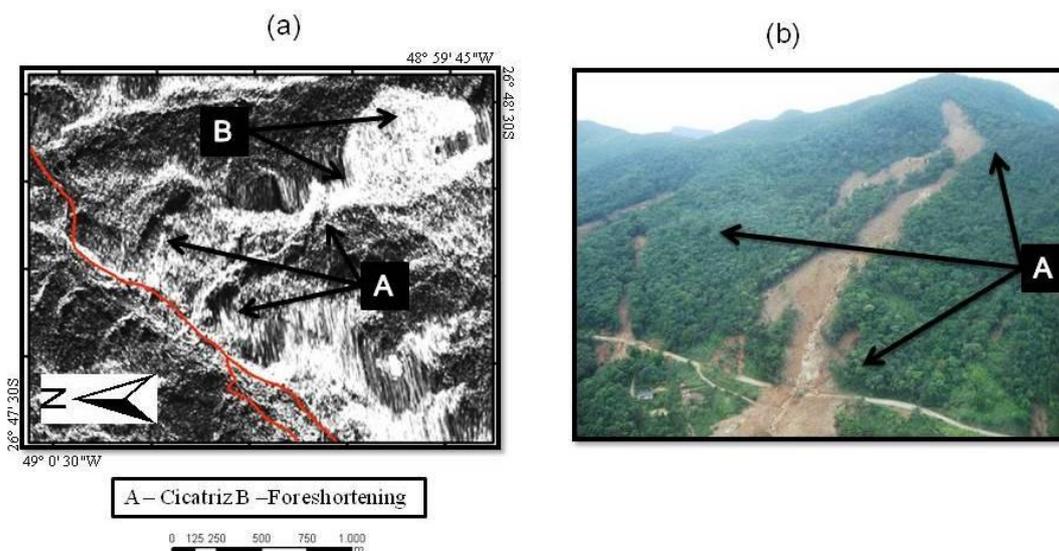


Figura 5.25 – Grande cicatriz sobre estrada de Luis Alves. (a) Cicatriz de deslizamento sobre área de *layover* na ortoimagem SM/TSX. Linha em vermelho: estrada de Luis Alves. (b) Fotografia de campo. Fonte: Vianna e Souza (2009).

O uso de informações de contexto, como localização de estradas e canais de drenagem oriundos de cartas topográficas ou de uma imagem pré-evento, auxiliaram no processo de identificação de áreas atingidas pelos deslizamentos de terra. Isto pode ser verificado em uma cicatriz localizada sobre um trecho meândrico do Ribeirão do Baú, na localidade do Alto Baú (Figura 5.26). A direção de movimento desta cicatriz principal deu-se no sentido NNW – SSE, com comprimento aproximado de 620 metros e altura de 120 metros.

Assim como observado na Figura 5.25, pode-se identificar indiretamente pela dimensão do movimento de massa, que a estrada foi afetada pelo material movimentado após a ruptura da vertente. Este mesmo material movimentado também atingiu o canal de drenagem do Ribeirão do Baú (Figura 5.27), ocasionando pontos de alagamento e alteração do canal de drenagem devido à barragem do curso d'água principal.

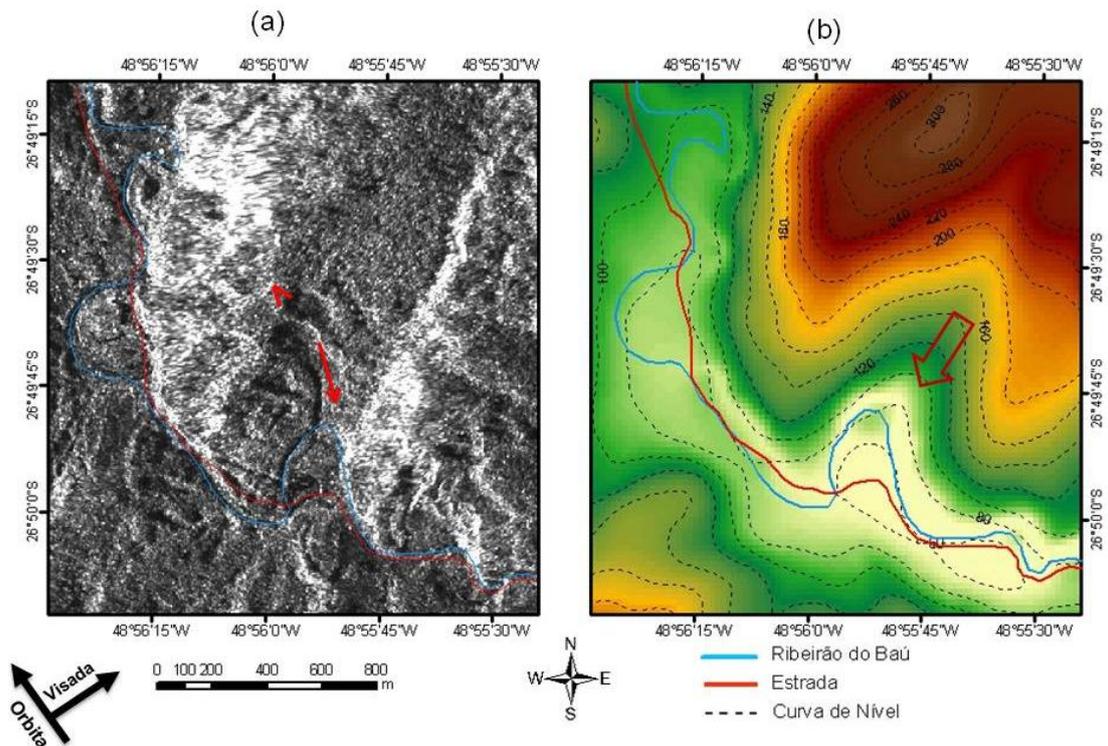


Figura 5.26 – Deslizamento sobre um trecho meândrico do Ribeirão do Baú. (a) Cicatriz de deslizamento na ortoimagem SM/TSX. (Λ) Ruptura superior da cicatriz. (↓) Direção do movimento. (b) Dados topográficos da área afetada.

A seta vermelha na Figura 5.26b indica a posição aproximada do observador durante a captura da fotografia de campo (Figura 5.27) da área afetada pelo material movimentado. Nesta fotografia se pode observar que este trecho sinuoso do Ribeirão do Baú ao ser atingido pelo deslizamento teve sua direção alterada, escoando próximo da estrada.



Figura 5.27 – Fotografia de campo da cicatriz de deslizamentos sobre o Ribeirão do Baú.  
Azimute aproximado da foto 235°. Foto: Joel Pellerin (05/12/2008).

A linha tracejada vermelha na Figura 5.27, corresponde ao trecho meândrico do canal do Ribeirão Baú que foi atingido pelo deslizamento, já linha tracejada preta representa a localização da estrada. As setas vermelhas na foto indicam área afetada pelo material movimentado.

Com base no modelo fotointerpretativo desenvolvido, foi realizado o mapeamento de 153 cicatrizes de deslizamento sobre vertentes não afetadas por distorções geométricas na região do complexo do Baú. Este modelo foi aplicado em áreas sem informação prévia de ocorrência de deslizamentos. Após esta etapa de identificação foi então realizada a avaliação da acurácia do mapeamento, discutida no item a seguir.

### **5.3.2. Avaliação do mapeamento das cicatrizes de deslizamentos**

Neste item são apresentados os resultados da avaliação do mapeamento de cicatrizes identificadas sobre a ortoimagem TerraSAR-X, bem como a influência dos parâmetros do sensor e do alvo no processo de interpretação. Por meio de trabalho de campo foi realizada a verificação da ocorrência de deslizamento de terra, registro fotográfico, observação sobre a orientação da cicatriz e de características do ambiente afetado.

Para a checagem em campo da acurácia do mapeamento das cicatrizes, foram visitados 27 coordenadas com a localização de deslizamentos de terra identificados previamente sobre a ortoimagem SM/TSX.

Foi levantado outro conjunto de 10 coordenadas durante o trabalho de campo, contendo a localização de ocorrência de deslizamentos que não foram identificados previamente sobre a ortoimagem SM/TSX. Estes pontos foram adquiridos com o objetivo de se analisar as características destas cicatrizes não identificadas durante o processo de interpretação visual. A Figura 5.28 apresenta a disposição dos pontos visitados. As coordenadas destes pontos podem ser consultadas na Tabela C.1 no Apêndice C.

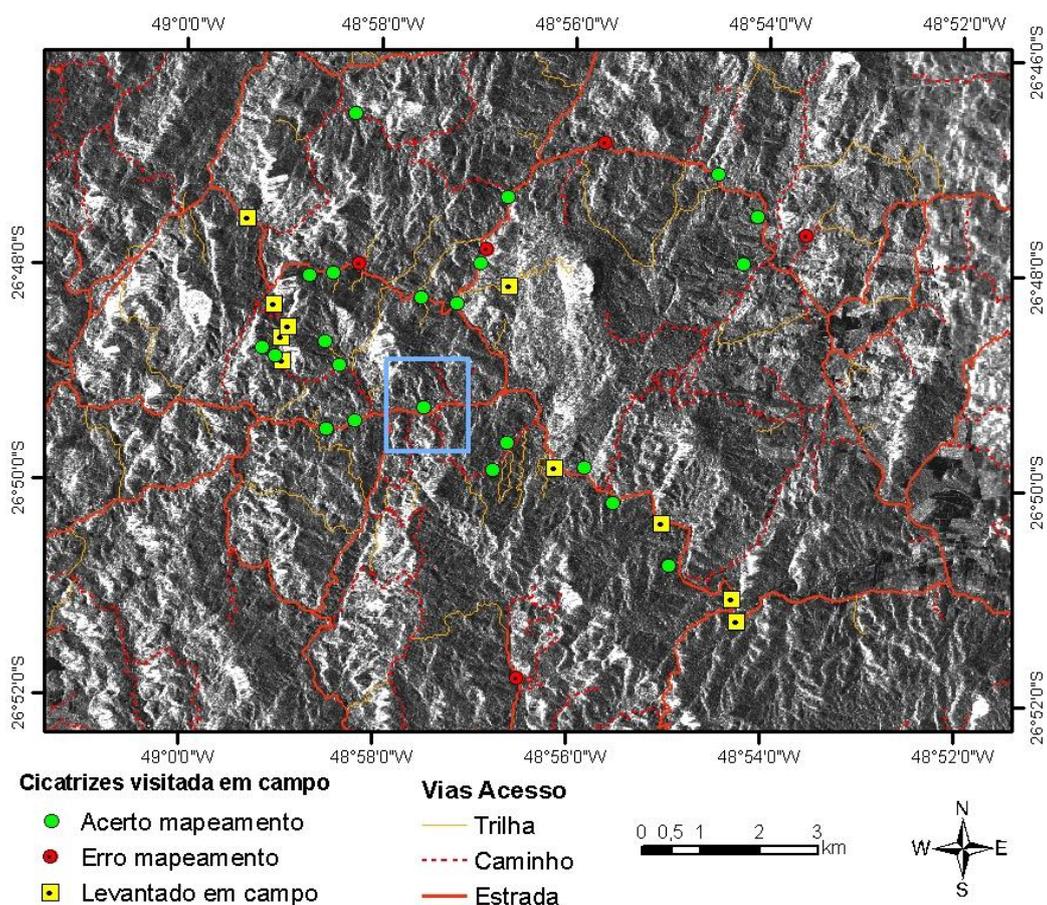


Figura 5.28 – Distribuição dos pontos visitados em trabalho de campo sobre a ortoimagem SM/TSX. Polígono azul: área do PC2.

Conforme apresentado na Figura 5.28, do conjunto de 27 pontos selecionados para checagem de campo, foi confirmada a existência de deslizamento em 22 destes pontos visitados, o que correspondeu a um acerto de 81% do conjunto selecionado para verificação. O polígono azul na Figura 5.28 corresponde à localização de um complexo de grandes deslizamentos identificado na ortoimagem ST/TSX, que ocorreu em umas das regiões mais afetadas, denominada de PC2 (Ponto Crítico 2). Sobre essa área (Figura 5.29), inúmeras construções foram destruídas (casas, igreja, cemitério e escola) ocasionando óbitos de vários moradores desta localidade.



Figura 5.29 – Fotografias de campo obtidas durante sobrevoo da área do PC2.

Fotos: Joel Pellerin 05/12/2008.

Um dos principais fatores que possibilitou a identificação destas cicatrizes avaliadas foi a orientação do movimento do deslizamento em relação à geometria de visada da imagem TerraSAR-X (visada do sensor para leste). Para avaliar este efeito, as medidas de direção do movimento dos deslizamentos foram obtidas em campo e reunidas em um diagrama de roseta (Figura 5.30), representando a direção de movimento da cicatriz no sentido de desnível da vertente.

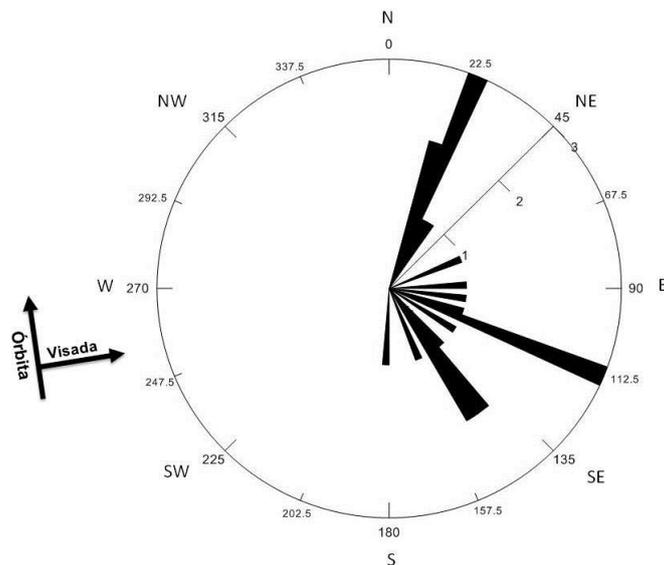


Figura 5.30 – Diagrama de roseta mostrando a direção e sentido do movimento das cicatrizes corretamente mapeadas sobre a ortoimagem SM/TSX.

Devido ao azimute de visada da órbita ascendente do SM/TSX, as vertentes distais, com orientação predominante para leste, são as que não apresentaram efeitos de *layover* ou *foreshortening* (quadrantes NE e SE) o que possibilitou a detecção dos deslizamentos. Foram então identificadas corretamente as cicatrizes com movimentos entre as direções NNE e ESE e com orientações formando ângulos razoáveis com o azimute de visada ENE do SAR. Quanto à dimensão destas cicatrizes, observou-se que o comprimento destas cicatrizes variou entre 170 a 700 metros, aproximadamente.

Entre as cicatrizes de deslizamento que foram erroneamente detectadas, as principais características estão relacionadas à confusão com feições de aparência semelhante de uma cicatriz, como por exemplo, quebras negativas do relevo ou vias de acesso (caminhos, estradas, trilhas) em vertentes. Foi observado sobre a ortoimagem TerraSAR-X que estas duas feições possuem forma linear, tonalidade escura e textura lisa, conforme ilustrado na Figura 5.31.

Outro motivo de erro na identificação de cicatriz foi devido à confusão ocorrida na interpretação de vertentes que apresentam um contraste brusco, entre áreas de vegetação de floresta com outro tipo de cobertura do solo, qual apresenta forma geométrica regular, como apresentado na Figura 5.32. Não foi observado influência da sombra de relevo na capacidade de detecção destas cicatrizes de deslizamento visitadas em campo.

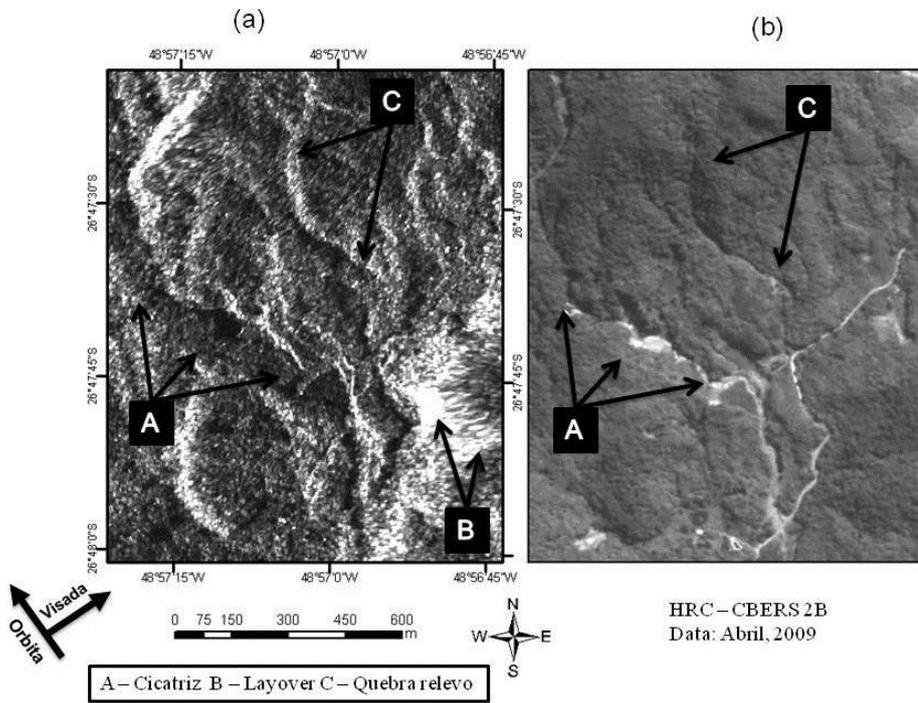


Figura 5.31– Feições lineares erroneamente identificadas como cicatriz. (a) Ortoimagem SM/TSX. (b) Imagem óptica de alta resolução espacial.

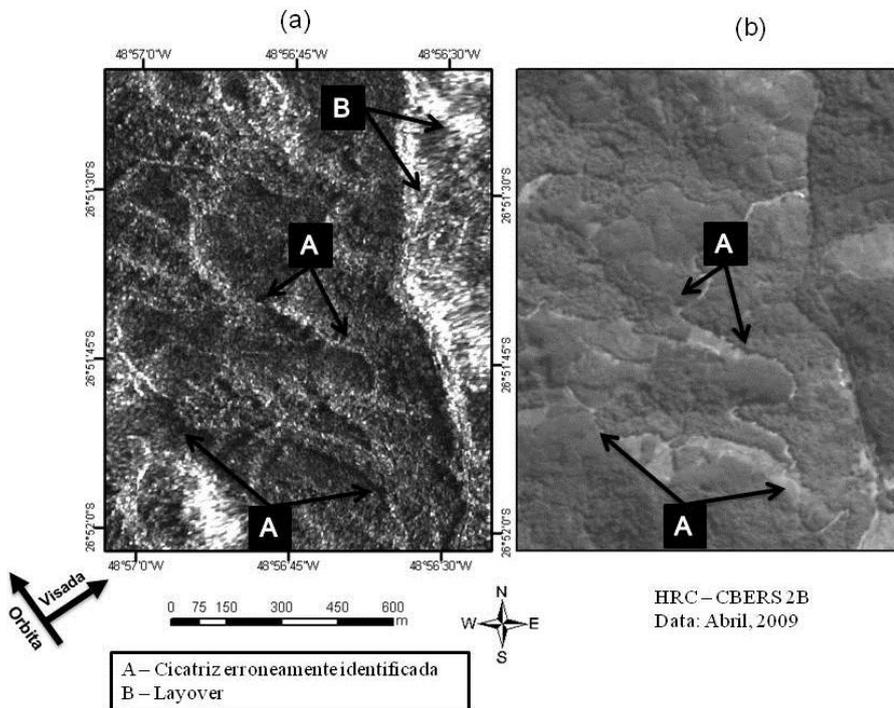


Figura 5.32 – Áreas erroneamente identificadas como cicatriz. (a) Ortoimagem SM/TSX. (b) Imagem óptica de alta resolução espacial.

Em relação às cicatrizes de deslizamento levantadas, que não foram identificadas antes do processo de checagem de campo (erro de omissão), um dos principais motivos da não detecção, foi devido à localização em vertentes com orientação na direção dos quadrantes NW e SW. Cinco destas cicatrizes levantadas possuem o sentido de movimento entre as direções WNW e SW, conforme o diagrama de roseta da Figura 5.33.

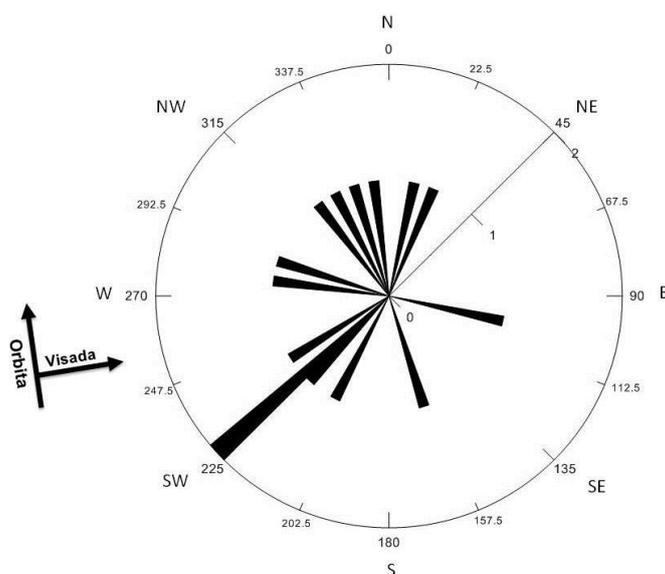


Figura 5.33 – Diagrama de roseta mostrando a direção e sentido do movimento das cicatrizes não detectadas com a ortoimagem TSX.

Para demonstrar a influência da orientação da cicatriz em relação ao azimute do sensor, na Figura 5.34 são mostradas duas vertentes com ocorrência de deslizamento tanto na face voltada para oeste como na face voltada leste. As cicatrizes com movimento de deslizamento sobre as encostas orientadas a leste foram corretamente identificadas na ortoimagem SM/TSX, porém as cicatrizes de deslizamento sobre as encostas com orientação a oeste, não foram identificadas.

No diagrama de roseta das cicatrizes que não foram detectadas na ortoimagem TSX (Figura 5.33), um deslizamento de terra ocorreu com a direção ESE e outro deslizamento na direção SSE, correspondendo a faces de vertentes passíveis de

identificação (face dorsal ao apontamento do sensor). No entanto, ambas as cicatrizes possuíam dimensão inferior a 100 metros de comprimento, situadas próximas à estrada e em uma área de vale estreito, condições que dificultou a detecção. A Figura 5.35 apresenta estas duas cicatrizes não detectadas.

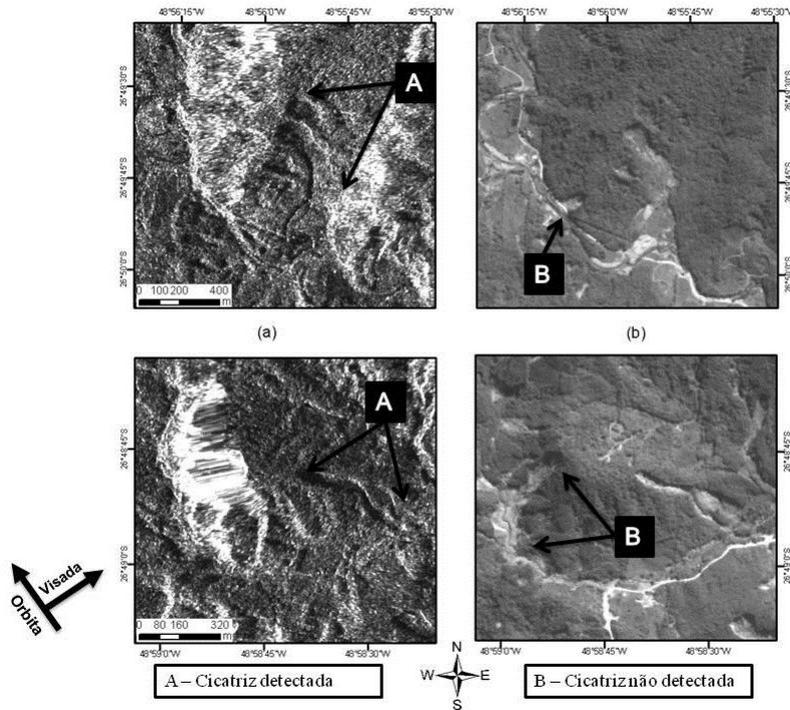


Figura 5.34 – Cicatrizes de deslizamento com orientação de movimento sobre as faces oeste e leste das encostas. (a) Ortoimagem TSX. (b) Imagem HRC/CBERS 2B, Abril de 2009.



Figura 5.35 – Cicatrizes não identificadas na Ortoimagem TSX. (a) cicatriz de deslizamento com orientação de movimento ESE. (b) cicatriz de deslizamento com orientação de movimento SSE.

Fotos: Rogério Marinho e Harideva Égas (2010).

Conforme os resultados apresentados na investigação foi possível a detecção de cicatrizes deslizamento de terra por meio da interpretação visual de imagem SAR de alta resolução espacial, embora deva ser mencionado, que a geometria de imageamento da imagem TerraSAR-X utilizada não foi a mais adequada para este tipo de relevo.

Estes resultados enfatizam a grande potencialidade de uso de uma mesma imagem SAR de alta resolução espacial para a identificação de áreas afetadas por deslizamentos de terra.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De modo geral, os resultados obtidos com a abordagem utilizando classificação por computador no mapeamento das áreas inundadas e análise visual para a detecção de cicatrizes de deslizamento se mostraram adequados para a caracterização destes eventos ocorridos em Santa Catarina. A seguir são apresentadas as conclusões e recomendações específicas para cada tema explorado neste trabalho, inundação e deslizamento de terra.

- **Mapeamento das inundações**

A pesquisa mostrou que imagens SAR multifontes (sensores com diferentes frequência e resolução espacial) em abordagem multitemporal são valiosas no mapeamento de áreas afetadas por inundações através de classificação temática. Ressalta-se, neste sentido, a importância da correção geométrica rigorosa dos dados SAR para geração de informação de localização com qualidade, e para permitir estabelecer, de modo adequado, o espaçamento de pixel comum, fundamental na comparação entre respostas dos vários sistemas para os mesmos locais no terreno.

O uso de composições coloridas de ortoimagens SAR, adquiridas em diferentes datas e por diferentes sensores, possibilitou uma visualização rápida da situação de inundação sobre a área em análise. A utilização do classificador temático ISODATA permitiu processar as ortoimagens com rapidez, abrindo perspectivas reais de uso operacional em aplicações similares. Além disso, o emprego da máscara de relevo contribuiu para evitar a inclusão de áreas de sombras de relevo na classificação das áreas inundadas.

Foi possível realizar o mapeamento das áreas inundadas, por meio de imagens SAR de média (FBD/PALSAR, ASAR, STD5/RST-2) e alta resolução espacial (TSX e FBS/PALSAR), adquiridas em diferentes comprimentos de onda (bandas X, C e L), azimutes de visada distintos (ascendente e descendente) e com ângulos de incidência variados.

Foi verificado que a resolução espacial é um dos parâmetros do sensor com maior influência na capacidade de identificação e delimitação dos limites de alvos afetados por inundação, como estradas, limites de plantações e os canais de drenagens.

Os resultados das classificações das áreas inundadas mostram que, em termos de acurácia, o melhor desempenho foi obtido com o uso da ortoimagem FBD/PALSAR de 14/09/2008, com duas classes analisadas (água e não água) e valor do índice *kappa* de 0,88. No caso das ortoimagens com três classes analisadas (água, não água e vegetação alagada), a classificação com a cena ASAR forneceu o melhor índice *kappa*, com o valor de 0,86. Nas demais imagens SAR (STD5/RST-2, TSX e FBS/ PALSAR) foram obtidos valores do índice *kappa* igual ou superior a 0,77.

O fator temporal possui grande influência na capacidade de detecção das áreas inundadas, sendo recomendando a ativação do sensor SAR o mais próximo do pico de chuvas e durante um período de aproximadamente sete dias posterior ao evento.

Para o evento ocorrido em novembro de 2008 no Vale do Itajaí, foi possível detectar grandes manchas de inundações por meio de imageamento SAR realizado quatro dias após as fortes chuvas dos dias 22 e 23 de novembro de 2008. A imagem ASAR do dia 27 de novembro, em conjunto com as cenas adquiridas entre os dias 28 de novembro e 01 de dezembro de 2008, possibilitaram caracterizar a dinâmica temporal das manchas de inundação sobre a região de Gaspar.

A análise de dados multitemporais sobre a região de Gaspar, permitiu identificar a influência da quantidade de chuvas sobre uma das áreas mais afetadas pelo evento de 2008. Este tipo de resultado pode ser utilizado para indicar terrenos com maior dificuldade de escoamento devido a maior permanência da mancha de inundação sobre estas áreas.

Em eventos de desastres naturais, resultado de fortes chuvas, o monitoramento da dinâmica de inundação por meio de imagens SAR pode ser acompanhado tanto pela

presença de manchas de inundação, como pela análise das áreas de vegetação alagada.

A demonstração da viabilidade de monitoramento de áreas afetadas por fortes chuvas enfatizam a importância do uso de imagens SAR em ações operacionais da defesa civil e de outras instituições, como por exemplo, na análise de áreas com infraestruturas afetadas, vias de acesso (estradas, pontes, etc.), áreas em risco de inundação e na avaliação de prejuízos.

- **Detecção das cicatrizes de Deslizamentos de terra**

Foi confirmada a hipótese de que é possível a detecção de cicatrizes de deslizamentos de terra por meio de imagem SAR de alta resolução espacial. Os principais fatores que favoreceram a identificação de cicatrizes foram a presença de contraste de retroespalhamento entre as áreas de deslizamentos (respostas de rugosidade mais lisa) e o entorno com cobertura vegetal de floresta (rugosidade média), e a forma geométrica destas.

A disponibilidade de um acervo de dados auxiliares de referência sobre a área afetada, como por exemplo, cartas topográficas e imagem adquirida antes do evento, facilitou o processo de detecção das cicatrizes. Neste sentido, o uso de ortorretificação (correção geométrica rigorosa com uso de DEM) é fundamental para a extração de informações com elevada acurácia posicional. Fator de grande importância para o deslocamento de equipes de buscas e salvamentos.

Os dois parâmetros do sistema que influenciaram a capacidade de detecção foi o ângulo de incidência e o azimute de visada. Em regiões de relevo acidentado como na área-teste, a detecção foi prejudicada pela baixa incidência da imagem TerraSAR-X devido aos efeitos de distorções geométricas causadas por *foreshortening* e *layover*. Sob a condição de baixa incidência, cicatrizes presentes em encostas proximais podem não ser detectadas. O azimute de visada também dificulta a detecção de cicatrizes com

orientação paralela ao apontamento da antena do SAR. Para a resolução deste problema, é sugerida a aquisição de imagens com visadas opostas (órbitas ascendente e descendente) sobre a área afetada.

Para uma melhor detecção de cicatrizes de deslizamento de terra com dimensão inferior a 200 metros de comprimento, recomenda-se o uso de imagens SAR com resoluções melhor que 3 metros, o que pode ser obtido por meio de imagens SAR com aquisição no modo Spotlight, disponível nos sensores Cosmo SkyMed, RADARSAT-2 e TerraSAR-X.

Considerando que o fator tempo de identificação de áreas afetadas por deslizamentos de terra têm reflexos na resposta mais rápida para o apoio às vítimas, e no controle dos prejuízos, o uso de imagens SAR neste tipo de desastres naturais se reveste de enorme importância, particularmente pela grade resolução temporal (dados diurnos e noturnos) e viabilidade de prover informações do terreno, em condições atmosféricas desfavoráveis ao uso de outros sistemas.

### **Recomendações**

A pesquisa desenvolvida realça a importância de expandir o uso de dados SAR no gerenciamento de eventos de risco, em função de suas características de aquisição. Limitações ocorridas neste trabalho, relacionadas à resolução espacial ou temporal (tempo de revisita), podem ser superadas atualmente pela grande disponibilidade de sensores SAR com diferentes atributos (frequência, resolução espacial, resolução temporal, rapidez no fornecimento das imagens, etc.).

Deve-se enfatizar ainda, a definição de uma configuração adequada de imageamento durante o processo de solicitação da imagem, além da realização de uma correção geométrica rigorosa e da correta interpretação dos alvos de interesse (áreas inundadas e cicatrizes de deslizamentos de terra).

Neste sentido, para o mapeamento de área inundadas com imagens SAR, deve-se levar em consideração o tipo de ambiente afetado (plano ou montanhoso, rural ou urbano) e suas implicações no retroespalhamento, compromisso entre resolução espacial e área imageada (análise regional ou local) e a aquisição de imagens multitemporais o mais próximo do pico de chuva.

Para a detecção de cicatrizes de deslizamentos de terra, além de se considerar o tipo de ambiente, recomenda-se a aquisição de imagens SAR de alta resolução espacial ( $\leq 3$  metros), geometria de imageamento com ângulos de incidência intermediários e elevados ( $>45^\circ$ , dependendo do relevo) e azimute de visada nas órbitas ascendente descendente. Além disso, a organização de uma base de cartográfica de referência, composta de imagens pré-evento de alta resolução espacial e cartas topográficas em escala de detalhe, possibilita um melhor desempenho do processo de detecção das cicatrizes.

Por fim, espera-se que os procedimentos adotados neste trabalho, para o mapeamento de áreas inundadas e cicatrizes de deslizamento, orientem trabalhos futuros relacionados ao uso de imagens SAR no atendimento emergencial de áreas afetadas por desastres naturais, como no evento ocorrido em 2008 no Vale do Itajaí.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, C.; CHOROWICZ, J.; BOUKHEIR, R.; DHONT, D. Comparative use of processed satellite images in remote sensing of mass movements: Lebanon as a case study. **International Journal of Remote Sensing** v. 28, n. 19, p. 4409-4427, 2007.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Hidroweb – Banco de dados Hidrológicos. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em 15/10/ 2009.

ANH, T. T.; DINH, D. N. Flood Monitoring Using ALOS/PALSAR Imagery. In: FIG REGIONAL CONFERENCE, 7. Hanoi, Vietnam, 2009. **Proceedings...** . p.19-22. Hanoi, Vietnam, 2009. Disponível em: <[www.fig.net/pub/vietnam/ppt/ts03e/ts03e\\_tuantrananh\\_ppt\\_3720.pdf](http://www.fig.net/pub/vietnam/ppt/ts03e/ts03e_tuantrananh_ppt_3720.pdf) > Acesso em 18/02/2010.

AUMOND, JUARÊS J.; SEVEGNANI, L.; TACHINI, M.; BACCA, L. E. Condições naturais que tornam o vale do Itajaí sujeito aos desastres. n: Frank, B.; Sevegnani, L. (orgs.) **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. água, gente e política**. Blumenau: Agencia de Água do Vale do Itajaí, 2009.

AUMOND, JUARÊS J. Geologia e paleoambiente. In: Aumond, J. J.; Pinheiro, A.; Frank, B. (orgs.) **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Blumenau: Edifurb, 2003.

BADJI, M.; DAUTREBANDE, S. Characterization of flood inundated areas and delineation of poor drainage soil using ers-1 SAR imagery. **Hydrological Processes**, v. 11, p. 1441-1450, 1997.

BALZ, T.; e LIAO, M. Building-damage detection using post-seismic high-resolution SAR satellite data. **International Journal of Remote Sensing** v.31, n. 13 p.3369 – 3391, 2010.

BATISTA, G. V. **Análise ambiental da sub-bacia hidrográfica do rio dos Porcos - SC**. 2004. 142 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PGCN0388-D.pdf> > Acesso em: 19/01/2011

BONN, F.; DIXON, R. O. Monitoring Flood Extent and Forecasting Excess Runoff Risk with RADARSAT-1 Data. **Natural Hazards**, v. 35, p. 377-393, 2005.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Resposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre**. Florianópolis: CEPED, 2009.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

BUNGE, FUNDAÇÃO. **Conhecer para sustentar: um novo olhar sobre o Vale do Itajaí**. São Paulo: Fundação Bunge, 2009.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING **Globesar 2: processamento e extração de informação de imagens de radar**. Ottawa, on: CCRS, 1997.

CASTRO, ANTÔNIO LUIZ COIMBRA DE. **Manual de Desastres – Volume I: Desastres Naturais**. Brasília: Secretário Nacional de Defesa Civil, 2003.

CHEN, P.; LIEW, S. C.; LIM, L. Flood detection using multitemporal Radarsat and ERS SAR data. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 1999, Manila, Philippines. **Proceedings...** Manila, Philippines: AARS, 1999. Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1999/ps6/ps6044.asp>> Acesso em: 18/01/ 2010.

CHOROWICZ, J.; SCANVIC, J.Y.; ROUZEAU, O.; VARGAS CUERVO, G. Observation of recent and active landslides from SAR ERS-1 and JERS-1 imagery using a stereo-simulation approach: example of the Chicamocha valley in Colombia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 16, p. 3187-3196, 1998.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia** 2<sup>a</sup> ed. Sao Paulo, SP: Edgard Blucher, 1980.

CHUBEY, M. S.; HATHOUT, S. Integration of RADARSAT and GIS modelling for estimating future Red River flood risk. **Geojournal**, v. 59, p. 237-246, 2004.

COSTA, M. P.; NIEMANN, O.; NOVO, E.; AHERN, F. Biophysical properties and mapping of aquatic vegetation during the hydrological cycle of the Amazon oodplain using JERS-1 and Radarsat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 7, p. 1401 -1426, 2002.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Joinville (SC) – geológica - SG - 22 - Z - B - Programa Geologia do Brasil, - escala 1:250.000**. Porto Alegre, 2010.

CUNHA, SANDRA B.; GUERRA, ANTONIO J.T. Degradação Ambiental. In: CUNHA, SANDRA B.; GUERRA, ANTONIO J.T. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 8<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA (DEDC-SC) – **Relatório de Situação**. Disponível em: <[http://www.defesacivil.sc.gov.br/images/stories/31\\_12\\_08.doc](http://www.defesacivil.sc.gov.br/images/stories/31_12_08.doc)> Acesso em: 09/08/2009.

DEWAN, A. M.; KUMAMOTO, T.; NISHIGAKI, M. Flood Hazard Delineation in Greater Dhaka, Bangladesh Using an Integrated GIS and Remote Sensing Approach. **Geocarto International**, v. 21, n. 2, p.33-38, 2006.

DIERKING, W. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signatures analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2397-2412, 1999.

EARTH'S DYNAMIC SYSTEMS - **Web Edition 1.0**. Disponível em: <  
<http://earthds.info/index.html>> Acesso em: 17/09/2010.

ELACHI, CHARLES; VAN ZYL, JAKOB. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. 2nd Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.

EMBRAPA, EMBRAPA. **Mapa de Solos do Estado de Santa Catarina** – Escala 1:250.000, [S.l.: s.n.], 1998.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA – EPAGRI. **O arroz pré-germinado em Santa Catarina**. Disponível em:  
[http://www.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=32&Itemid=47](http://www.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=32&Itemid=47). Acesso em: 07/01/2011.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **EnviSat ASAR Product Handbook, issue 2.2**  
Disponível em: < <http://envisat.esa.int/handbooks/asar/>> Acesso em: 21 jun. 2009

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA); MACDONALD DETTWILLER ASSOCIATES (MDA).  
**ENVISAT-1 Products Specifications Volume 8: ASAR Products Specifications**.  
Disponível em: < <http://envisat.esa.int/support-docs/productspecs/>> Acesso em: 21 abr. 2010

FARIA, D. G. M.; SANTORO, J.; TOMINAGA, L. K.; BROLLO, M. J.; SILVA, P. F.; RIBEIRO, R. **Relatório do atendimento emergencial realizado pelo instituto geológico em Santa Catarina em razão do desastre ocorrido em novembro de 2008**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2008.

FRAGA, N.C. Enchentes urbanas no Vale do Itajaí, Brasil. 25 anos da enchente catástrofe de 1983 - reflexos socioambientais e culturais no Século XXI. In: Encontro Nacional de Geógrafos da America Latina, 12., 2009, Montevideu, Uruguai.

FRANÇA, A. M. S.; FLORENZANO, T. G.; NOVO, E. M. L. M. Avaliação de fusão de imagens ópticas e micro-ondas no mapeamento de morfologias lacustres. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 2, p. 205-211, 2007.

FRITZ, T. **TerraSAR-X ground segment level 1b product format specification (10.12.2007), Doc.: TX-GS-DD-3307**. Disponível em:  
[http://www.dlr.de/tsx/documentation/TX-GS-DD-3307\\_Level-1b-Product-Format-Specification\\_1.3.pdf](http://www.dlr.de/tsx/documentation/TX-GS-DD-3307_Level-1b-Product-Format-Specification_1.3.pdf). Acesso em: 17/05/2010.

GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC. **Mapeamento Temático Geral do Estado de Santa Catarina. Relatório Técnico: GEO-RLT-C0715-33608-01**. Florianópolis, 2008.

GIANINETTO, M.; VILLA, P.; MEMBER, S. Rapid Response Flood Assessment Using Minimum Noise Fraction and Composed Spline Interpolation. **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 10, p. 3204-3211, 2007.

GILLESPIE, T. W.; CHU, J.; FRANKENBERG, E.; THOMAS, D; Assessment and prediction of natural hazards from satellite imagery. **Progress in Physical Geography**, v. 31, n. 5, p. 459-70, 2007.

GUERRA, ANTONIO J. T. Encostas e a Questão Ambiental. In: CUNHA, S. B. e GUERRA, ANTONIO J. T. (org.) **A Questão Ambiental: diferentes abordagens**. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2007.

GUIMARÃES, RENATO F.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, ROBERTO A. T., FERNANDES, NELSON F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2008.

GUO, H.; MA, J.; ZHANG, B.; LI, Z.; HUANG, J.; ZHU, L. Damage consequence chain mapping after the Wenchuan Earthquake using remotely sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, p. 3427–3433, 2010.

HANSSEN, R. F. **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

HENDERSON, F. M. Environmental factors and the detection of open surface water using x-band radar imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 13, p. 2423–2437, 1995.

HENRY, J.; CHASTANET, P.; FELLAH, K.; DESNOS, Y. Envisat multipolarized ASAR data for flood mapping. **International Journal of Remote Sensing**. v. 27, n. 10, p. 1921-1929, 2006.

HERRMANN, J.; BOTTERO, A. G. TerraSAR-X mission: The new generation in high resolution satellites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 7063-7070. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.14.00>>. Acesso em: 18 fev. 2010.

HESS, L.; MELACK, J. M. Mapping wetland hydrology and vegetation with Synthetic Aperture Radar. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**. v. 20, p. 197–205, 1994.

HESS, L.; MELACK, J.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 404-428, 2003.

HESS, L.; MELACK, J. M.; FILOSO, S.; WANG, Y. Delineation of inundated vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 896–904, 1995.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology** v.106, p. 211-232, 1989.

- INFOTERRA GmbH. **TerraSAR-X Mission**. Disponível em:  
<[http://www.infoterra.de/asset/cms/file/20100310\\_terrasar-x\\_i4\\_final.pdf](http://www.infoterra.de/asset/cms/file/20100310_terrasar-x_i4_final.pdf)> Acesso em 19/3/2010.
- INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS - IGCE. **Curso de Geologia Ambiental**. UNESP, Rio Claro, Disponível em:  
<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/riscos/risco11a.html>> Acesso em: 03/02/2010.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA) **PALSAR Calibration Factor Updated**. Disponível em: <[https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en\\_3.htm](https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.htm)> Acesso em 06/04/ 2010.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **Earth Observation Research Center. ALOS User Handbook**. NDX-070015. 2007. Disponível em:  
<<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/handbk.htm> > Acesso em 19/03/2011.
- JOYCE, K. E.; BELLISS, S. E.; V, S.; MCNEILL, S. J.; GLASSEY, P. J. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. **Progress in Physical Geography** v. 33, n. 2, p. 183-207, 2009.
- KATO, K., & YAMAZAKI, F. (2009). Characterization of Flooded Areas in the 2008 Myanmar Cyclone Using Alos/Palsar Data and DEM. In: 7th FIG REGIONAL CONFERENCE. **Proceedings...** Hanoi, Vietnam, 2009. Disponível em:  
<[http://www.fig.net/pub/vietnam/papers/ts03e/ts03e\\_tuan\\_doung\\_3720.pdf](http://www.fig.net/pub/vietnam/papers/ts03e/ts03e_tuan_doung_3720.pdf)> Acesso em: 18/02/2010.
- LEBERL, F. W. Radargrammetry. In: HENDERSON, F.; LEWIS, A. **Principles & applications of imaging radar, manual of remote sensing, 3. ed.** New York: John Wiley & Sons, Cap. 4, p. 183-269, 1998.
- KLEES, R.; MASSONNET, D. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. **Geologie en Mijnbouw** v. 77, p. 161-176, 1999.
- LEWIS, A. J., HENDERSON, P.M. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing v2- principles and applications of imaging radar**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998.
- LIAO, M.; ZHANG, L.; BALZ, T. Post-earthquake landslide detection and early detection of landslide prone areas using SAR. In: **2009 Urban Remote Sensing Joint Event. Proceedings...** Shanghai, China: IEEE, 2009. Disponível em:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5137742&isnumber=5137466>> Acesso em: 19/01/2010.
- LIMA, M. I. C. **Introdução a interpretação radargeológica**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 1995 (Manuais Técnicos em Geociências 3).
- MACDONALD, DETTWILER AND ASSOCIATES Ltd. (MDA). **RADARSAT-2 – PRODUCT DETAILS**. Disponível em: < [http://www.radarsat2.info/product/RS-2\\_Product\\_Details.pdf](http://www.radarsat2.info/product/RS-2_Product_Details.pdf)> Acesso em: 07 Ago. 2009

- MANTOVANI, F.; SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology**, v. 15, pp. 213-225, 1996.
- MARTINEZ, J.; TOAN, T. L. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 209 - 223, 2007.
- MARTINIS, S.; TWELE, A.; VOIGT, S. Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, p. 303-314, 2009.
- METTERNICHT, G.; HURNI, L.; GOGU, R. Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. **Remote Sensing of Environment** v. 98, n.2-3, 284-303, 2005
- MOEL, H.D.; ALPHEN, J.V.; AERTS, J. H. Flood maps in Europe – methods , availability and use. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, p. 289-301, 2009.
- NICO, G.; PAPPALEPORE, M.; PASQUARIELLO, G.; REFICE, A.; SAMARELLI, S. Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods - a GIS application. **International Journal of Remote Sensing** v. 21, n. 8, p.1619-1631, 2000.
- NOVO, E. M. L. M.; COSTA, M. P. F. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis. In: SOUZA, Ronald Buss (Ed.). **Oceanografia por satélites**. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2005. v. Cap. 16, p. 236-258
- NOVO, E. M. L. M. ; COSTA, M. P. F. ; MANTOVANI, J. E. RADARSAT Exploratory Survey on Macrophyte Biophysical Parameter in Tropical Reservoirs. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 4, p. 367-374, 1998.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008a. v. 01. 363 p.
- NOVO, E. M. L. M. Ambientes Fluviais. In: FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2008b.
- NATIONAL SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE (NSDI). 1998. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Disponível em: < <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDCstandards-projects/accuracy/part3/chapter3>>. Acessado em: 10/01/2011.
- OLMSTED, C. **Alaska SAR facility scientific SAR users guide**, ASF-SD-003, 1993.
- PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E. S. Radares Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.

- PARMUCHI, M. G.; KARSZENBAUM, H.; KANDUS, P. Mapping wetlands using multi-temporal RADARSAT-1 data and a decision-based classifier. **Can. J. Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 175-186, 2002.
- PCI GEOMATICS. **Geomatica OrthoEngine**, version.10.3. Ontario, Canada: PCI Geomatics Enterprises Inc., Richmond Hill Ontario, 2010. 179 p. User Guide.
- PINHEIRO, ADILSON. Hidrologia. In: Aumond, J. J.; Pinheiro, A.; Frank, B.(org.) **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Blumenau: Edifurb, 2003.
- PULVIRENTI, L.; CHINI, M.; PIERDICCA, N.; GUERRIERO, L.; FERRAZZOLI, P. Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n.4, p. 990-1002, 2011.
- REFOSCO, J. C.; PINHEIRO, A., Impacto do desflorestamento sobre o regime hídrico de uma bacia hidrográfica. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 1, n.2, p.18-26, 1999.
- ROESSNER, S.; WETZEL, H.U.; KAUFMANN, H.; SARNAGOEV, A. Potential of Satellite Remote Sensing and GIS for Landslide Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan ( Central Asia ). **Natural Hazards**, v. 35, p. 395-416, 2005.
- ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; ITO, N.; WATANABE, M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 11, p. 3307-3316, 2007.
- SANTOS, JONAS. T.; UBERTI, ANTONIO A. A. Solos. In: Aumond, J. J.; Pinheiro, A.; Frank, B.(org.) **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Blumenau: Edifurb, 2003.
- SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; VENEZIANI, P. Avaliação da estereoscopia SAR (RADARSAT-1) e híbrida (RADARSAT-1 & TM-Landsat-5) em mapeamento geológico na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2-suplemento, p. 153-160, 2003.
- SANTOS, A. R; VENEZIANI, P.; PARADELLA, W. R.; MORAIS, M. C. **Curso Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: aplicações**. São José dos Campos, 2000. (INPE-8117-PUD/099).
- SCHOWENGERDT, ROBERT A. **Remote sensing models and methods for image processing**. ed. 3. Burlington, MA: Academic Press, 2007
- SEVEGNANI, LÚCIA. Vegetação. In: Aumond, J. J.; Pinheiro, A.; Frank, B.(org.) **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Blumenau: Edifurb, 2003.
- SEVERO, DIRCEU LUIS. A meteorologia do desastre. In: In: **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. Água, gente e política**. Org.: Beate Frank e Lucia Sevegnani - Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009.
- SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.47, p. 3915-3932, 2009.

- SIGA JUNIOR, O. ; BASEI, M. A. S.; MACHIAVELLI, A. Evolução Geotectônica da Porção Nordeste de Santa Catarina e Sudeste do Paraná com base em Interpretações Geocronológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 23, n. 3, p. 215-223, 1993.
- SILVA, H. S. e SEVERO, D. L. Clima. In: Aumond, J. J.; Pinheiro, A.; Frank, B.(org.) **Bacia do Itajaí: Aspectos Físicos e Biológicos**. Blumenau: Edifurb, 2003.
- SILVA, W. S. B. **Uso de imagens Radarsat-1 para fins de mapeamento de uso da terra e cobertura do solo em ambiente tropical úmido urbano: o caso de Manaus, Estado do Amazonas**. 2002. 159 p. (INPE-10432-TDI/924). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/04.14.11.40>>. Acesso em: 22/07/2009.
- SILVA DIAS, M. A. F. S. **As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando a melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos**. São José dos Campos: INPE, 2009. 67 p. (INPE-16631-RPQ/255). Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.05.11.33>>. Acesso em 10 mar. 2009.
- SINGHROY, V. Integrated Techniques for Geohazard Assessment. **Advances in Space Research**. v. 15, n. 11, p. 67-78, 1995.
- SINGHROY, V.; MOLCH, K. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. **Advances in Space Research**, v. 33, p. 290-295, 2004.
- SINGHROY, V.; SAINT-JEAN, R. Effects of Relief on the Selection of RADARSAT-1 Incidence Angle for Geological Applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**. v. 25, p. 211-217, 1999.
- SINGHROY, V.; MATTAR, K. E.; GRAY, A. L. Landslide Characterisation in Canada Using Interferometric SAR and Combined SAR and TM Images. **Advances in Space Research**, v. 21, n. 3, 1998.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Noticiário Geomorfológico**, v.16, n.32, p. 71-104, 1976.
- SONG, Y.; SOHN, H.; PARK, C. Efficient Water Area Classification Using Radarsat-1 SAR Imagery in a High Relief Mountainous Environment. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** v. 73, n. 3, p. 285–296, 2007.
- SUZUKI, T.; SHIBAYAMA, T.; UDONO, T. High resolution SAR images of landslides triggered by Sichuan and Iwate-Miyagi earthquakes. In: The First World Landslide Forum, 2008. Tokio, Japão. **Proceedings...** Disponível em:  
<[http://150.217.73.85/wlfpdf/01\\_Suzuki.pdf](http://150.217.73.85/wlfpdf/01_Suzuki.pdf)>. Acesso em: 19 jan. 2010.
- TACHINI, MARIO. Descrição do Desastre: a inundação. In: **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. Água, gente e política**. Org.: Beate Frank e Lucia Sevegnani - Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009.

- THE INTERNATIONAL CHARTER, "Space and Major Disasters," Disponível em: <<http://www.disasterscharter.org>>. Acesso em: 18 mar. 2011.
- TOMINAGA, LÍDIA K. Desastres naturais: por que ocorrem? In: TOMINAGA, LÍDIA K. et al., (orgs). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.
- TOWNSEND, P. A., WALSH, S. J. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. **Geomorphology**, v. 21, p. 295-312, 1998.
- TRALLI, D. M.; BLOM, R. G.; ZLOTNICKI, V.; DONNELLAN, A.; EVANS, D. L. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing** v. 59, p.185-198, 2005.
- TREVETT, J. W. **Imaging radar for resources surveys**. New York: Chapman and Hall, 313p. 1986.
- ULABY, F. F.; MOORE, R. K.; FUNK, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Reading, MA, Addison-Wesley, v.2. 320p. 1982.
- UN-ISDR - International Strategy for Disaster Reduction. 2009. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. Disponível em <<http://www.unisdr.org>> Acesso em: 13/11/2010.
- VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2008.
- VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. Georgetown, Guyana: Tropenbos-Guyana Series, 330p.1997.
- VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia**. São José dos Campos: INPE, 1982. 61p. (INPE-2227-MD/014).
- VIANNA, L. F. N.; SOUZA, J. M. **Relatório sobre o levantamento dos deslizamentos ocasionados pelas chuvas de novembro de 2008 no complexo do Morro do Baú municípios de Ilhota, Gaspar e Luiz Alves**. Florianópolis: EPAGRI, 2009.
- VOIGT, S.; KEMPER, T.; RIEDLINGER, T.; KIEFL, R.; SCHOLTE, K.; MEHL, H. Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 45, n. 6, 2007.
- WANG, C.; WU, J.; Zhang, Y.; Pan, G.; Qi, J.; Salas, W. A. Characterizing L-Band Scattering of Paddy Rice in Southeast China With Radiative Transfer Model and Multitemporal ALOS/PALSAR Imagery. . **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 4, 2009.
- ZHOU, C.; LUO, J.; YANG, C.; LI, B.; WANG. S. Flood monitoring using multi-temporal AVHRR and RADARSAT imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** v. 66, n. 5, p. 633-638, 2000.



## APÊNDICE A

Tabela A.1 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortorectificação ASAR.

ICP	E (Referência)	N (Referência)	E (Ortoimagem)	N (Ortoimagem)	DISC (E) m	DISC (N) m
1	699992,69	7019774,00	700006,71	7019754,95	14,02	-19,05
2	704606,25	7022383,93	704631,12	7022366,99	24,87	-16,93
3	711173,54	7024344,93	711156,60	7024316,35	-16,93	-28,58
4	726893,97	7032194,37	726909,84	7032173,46	15,88	-20,90
5	729175,26	7045742,07	729193,52	7045723,02	18,26	-19,05
6	715794,00	7062040,50	715806,70	7062017,48	12,70	-23,02
7	713227,51	7057590,67	713249,47	7057561,83	21,96	-28,84
8	694320,19	7056818,50	694343,47	7056793,10	23,28	-25,40
9	697357,50	7051355,50	697381,05	7051330,10	23,55	-25,40
10	708760,88	7034191,91	708743,16	7034206,20	-17,73	14,29
11	718032,79	7038438,29	718067,45	7038417,92	34,66	-20,37
12	722544,98	7018678,12	722569,06	7018692,93	24,08	14,82
13	728145,16	7018963,50	728175,06	7018943,39	29,90	-20,11
14	705458,25	7000632,07	705437,08	7000610,90	-21,17	-21,17
15	731742,37	6987534,50	731756,13	6987517,57	13,76	-16,93
16	705396,23	7018638,46	705414,22	7018619,15	17,99	-19,31
17	715429,76	7011909,85	715407,01	7011930,49	-22,75	20,64
18	686663,13	7025913,35	686680,86	7025894,04	17,73	-19,31
19	678896,15	7035980,42	678875,24	7035964,02	-20,90	-16,40
20	680075,67	7037521,48	680049,74	7037501,10	-25,93	-20,37
21	684504,31	7047778,50	684480,50	7047757,07	-23,81	-21,43
22	690071,56	7028684,79	690055,42	7028667,06	-16,14	-17,73
23	695533,65	7030664,66	695510,37	7030642,97	-23,28	-21,70
24	701757,79	7044816,63	701780,01	7044836,48	22,23	19,84
25	718469,73	7028406,58	718493,54	7028392,29	23,81	-14,29
26	679135,45	7024473,23	679106,61	7024444,13	-28,84	-29,10
27	727726,06	7005177,08	727705,69	7005155,39	-20,37	-21,70

Tabela A.2 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortorectificação ASAR.

	E (m)	N (m)
<b>Média Discrepância</b>	3,73	-15,46
<b>Desvio Padrão</b>	22,03	14,49
<b>RMSE</b>	20,81	19,92

Tabela A.3 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem STD5/RST-2 Ascendente.

ICP	E (Referência)	N (Referência)	E (Ortoimagem)	N (Ortoimagem)	DISC (E) m	DISC (N) m
1	699992,69	7019774,00	700012,57	7019757,39	19,88	-16,61
2	704606,25	7022383,93	704625,23	7022369,69	18,98	-14,24
3	711173,54	7024344,93	711156,07	7024330,37	-17,46	-14,55
4	726893,97	7032194,37	726910,37	7032208,92	16,40	14,55
5	729175,26	7045742,07	729162,30	7045725,67	-12,96	-16,40
6	715794,00	7062040,50	715812,52	7062017,75	18,52	-22,75
7	713227,51	7057590,67	713243,38	7057565,80	15,88	-24,87
8	694320,19	7056818,50	694336,33	7056838,08	16,14	19,58
9	697357,50	7051355,50	697375,23	7051337,24	17,73	-18,26
10	708760,88	7034191,91	708773,58	7034175,51	12,70	-16,40
11	718032,79	7038438,29	718007,12	7038416,86	-25,66	-21,43
12	722544,98	7018678,12	722565,35	7018692,14	20,37	14,02
13	728145,16	7018963,50	728162,89	7018948,95	17,73	-14,55
14	705458,25	7000632,07	705442,90	7000604,55	-15,35	-27,52
15	731742,37	6987534,50	731760,90	6987508,84	18,52	-25,66
16	705396,23	7018638,46	705411,05	7018622,85	14,82	-15,61
17	715429,76	7011909,85	715448,81	7011924,14	19,05	14,29
18	686663,13	7025913,35	686646,46	7025896,68	-16,67	-16,67
19	678896,15	7035980,42	678881,86	7035967,72	-14,29	-12,70
20	680075,67	7037521,48	680093,39	7037504,54	17,73	-16,93
21	684504,31	7047778,50	684485,26	7047762,09	-19,05	-16,40
22	690071,56	7028684,79	690055,16	7028668,12	-16,40	-16,67
23	695533,65	7030664,66	695514,33	7030649,32	-19,31	-15,35
24	701757,79	7044816,63	701781,34	7044792,56	23,55	-24,08
25	718469,73	7028406,58	718448,03	7028421,13	-21,70	14,55
26	679135,45	7024473,23	679118,78	7024454,71	-16,67	-18,52
27	727726,06	7005177,08	727710,98	7005160,15	-15,08	-16,93

Tabela A.4 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem STD5/RST-2 Ascendente.

	E (m)	N (m)
<b>Média Discrepância</b>	2,12	-12,07
<b>Desvio Padrão</b>	18,17	13,88
<b>RMSE</b>	17,03	17,27

Tabela A.5 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortomagem STD5/RST-2 Descendente.

ICP	E (Referência)	N (Referência)	E (Ortomagem)	N (Ortomagem)	DISC (E) m	DISC (N) m
1	699992,69	7019771,35	700012,00	7019750,72	19,3146	-20,6375
2	704606,25	7022381,28	704631,91	7022355,88	25,6646	-25,4001
3	711173,54	7024342,28	711193,11	7024367,42	19,5792	25,1355
4	713227,51	7057588,03	713203,43	7057608,13	-24,0771	20,1084
5	694320,19	7056815,85	694346,65	7056834,38	26,4584	18,5209
6	697357,50	7051352,85	697383,69	7051331,42	26,1938	-21,4313
7	708760,88	7034189,27	708734,69	7034169,42	-26,1938	-19,8438
8	718032,79	7038435,65	718007,39	7038412,89	-25,4001	-22,7542
9	711073,35	7019201,07	711051,13	7019223,56	-22,2250	22,4896
10	705458,25	7000629,42	705431,52	7000606,93	-26,7230	-22,4896
11	705396,23	7018635,82	705422,95	7018660,69	26,7230	24,8709
12	686663,13	7025910,71	686687,21	7025886,63	24,0771	-24,0771
13	678896,15	7035977,77	678873,39	7035998,15	-22,7542	20,3730
14	680075,67	7037518,83	680055,56	7037496,61	-20,1084	-22,2251
15	684504,31	7047775,85	684527,59	7047797,81	23,2834	21,9605
16	690071,56	7028682,14	690046,96	7028657,54	-24,6063	-24,6063
17	695533,65	7030662,02	695556,67	7030646,14	23,0188	-15,8750
18	701757,79	7044813,99	701734,77	7044793,61	-23,0188	-20,3730
19	715258,62	7026773,85	715278,74	7026796,24	20,1189	22,3810
20	679135,45	7024470,59	679167,73	7024452,07	32,2792	-18,5209

Tabela A.6 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortomagem STD5/RST-2 descendente.

	E (m)	N (m)
<b>Média Discrepância</b>	2,58	-4,11
<b>Desvio Padrão</b>	24,76	22,00
<b>RMSE</b>	19,82	17,83

Tabela A.7 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem FBD/PALSAR.

ICP	E (Referência)	N (Referência)	E (Ortoimagem)	N (Ortoimagem)	DISC (E) m	DISC (N) m
1	699992,69	7019774,00	700016,50	7019752,83	23,81	-21,17
2	704606,25	7022383,93	704614,18	7022373,34	7,94	-10,58
3	711173,54	7024344,93	711184,12	7024347,57	10,58	2,65
4	726893,97	7032194,37	726888,67	7032186,43	-5,29	-7,94
5	729175,26	7045742,07	729177,91	7045736,78	2,65	-5,29
6	731353,87	7066586,06	731356,51	7066588,70	2,65	2,65
7	719820,81	7064107,00	719828,75	7064093,77	7,94	-13,23
8	715794,00	7062040,50	715796,65	7061998,17	2,65	-42,33
9	713227,51	7057590,67	713222,22	7057580,09	-5,29	-10,58
10	694320,19	7056818,50	694301,67	7056805,27	-18,52	-13,23
11	697357,50	7051355,50	697338,98	7051321,10	-18,52	-34,40
12	708760,88	7034191,91	708758,24	7034199,85	-2,65	7,94
13	718032,79	7038438,29	718043,37	7038427,71	10,58	-10,58
14	722544,98	7018678,12	722537,04	7018686,05	-7,94	7,94
15	728145,16	7018963,50	728176,91	7018960,85	31,75	-2,65
16	705458,25	7000632,07	705458,25	7000613,54	0,00	-18,52
17	731742,37	6987534,50	731755,60	6987492,17	13,23	-42,33
18	705396,23	7018638,46	705396,23	7018635,82	0,00	-2,65
19	715429,76	7011909,85	715432,41	7011912,50	2,65	2,65
20	686663,13	7025913,35	686676,36	7025902,77	13,23	-10,58
21	678896,15	7035980,42	678893,50	7035980,42	-2,65	0,00
22	680075,67	7037521,48	680062,44	7037479,14	-13,23	-42,33
23	684504,31	7047778,50	684501,66	7047767,92	-2,65	-10,58
24	690071,56	7028684,79	690079,50	7028676,85	7,94	-7,94
25	695533,65	7030664,66	695528,36	7030643,50	-5,29	-21,17
26	701757,79	7044816,63	701763,08	7044787,53	5,29	-29,10
27	737387,98	7008622,73	737403,85	7008641,25	15,88	18,52
28	718469,73	7028406,58	718459,15	7028388,06	-10,58	-18,52
29	679135,45	7024473,23	679138,10	7024460,00	2,65	-13,23
30	727726,06	7005177,08	727726,06	7005163,85	0,00	-13,23

Tabela A.8 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem FBD/PALSAR.

	E (m)	N (m)
<b>Média Discrepância</b>	2,29	-11,99
<b>Desvio Padrão</b>	11,19	15,07
<b>RMSE</b>	11,24	19,06

Tabela A.9 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão da ortoimagem FBS/PALSAR.

ICP	E (Referência)	N (Referência)	E (Ortoimagem)	N (Ortoimagem)	DISC (E) m	DISC (N) m
1	699992,69	7019774,00	700003,24	7019764,77	10,55	-9,23
2	704606,25	7022383,93	704617,09	7022375,20	10,85	-8,73
3	711173,54	7024344,93	711170,89	7024347,57	-2,65	2,65
4	726893,97	7032194,37	726903,23	7032181,88	9,26	-12,49
5	729175,26	7045742,07	729178,65	7045736,78	3,39	-5,29
6	731353,87	7066586,06	731357,19	7066580,77	3,32	-5,29
7	719820,81	7064107,00	719808,17	7064117,97	-12,65	10,97
8	715794,00	7062040,50	715806,49	7062028,36	12,49	-12,14
9	713227,51	7057590,67	713216,92	7057581,41	-10,58	-9,26
10	694320,19	7056818,50	694313,57	7056822,47	-6,61	3,97
11	697357,50	7051355,50	697364,11	7051363,44	6,61	7,94
12	708760,88	7034191,91	708758,24	7034197,20	-2,65	5,29
13	718032,79	7038438,29	718047,34	7038433,00	14,55	-5,29
14	722544,98	7018678,12	722537,04	7018683,41	-7,94	5,29
15	728145,16	7018963,50	728155,74	7018962,18	10,58	-1,32
16	705458,25	7000632,07	705446,34	7000620,16	-11,91	-11,91
17	705396,23	7018638,46	705397,55	7018637,14	1,32	-1,32
18	715429,76	7011909,85	715424,47	7011912,50	-5,29	2,65
19	695533,65	7030664,66	695532,33	7030664,66	-1,32	0,00
20	701757,79	7044816,63	701756,47	7044811,34	-1,32	-5,29
21	737387,98	7008622,73	737397,24	7008618,76	9,26	-3,97
22	718469,73	7028406,58	718473,70	7028407,90	3,97	1,32

Tabela A.10 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem FBS/PALSAR.

	E (m)	N (m)
<b>Média Discrepância</b>	1,51	-2,33
<b>Desvio Padrão</b>	8,39	6,80
<b>RMSE</b>	7,14	6,03

Tabela A.11 - Discrepâncias entre as coordenadas planimétricas utilizadas na avaliação da precisão ortoimagem TerraSAR-X.

ICP	E (Referência)	N (Referência)	E (Ortoimagem)	N (Ortoimagem)	DISC (E) m	DISC (N) m
1	704606,25	7022381,28	704612,89	7022376,61	6,64	-4,67
2	711173,54	7024342,28	711169,83	7024339,11	-3,70	-3,18
3	708760,88	7034189,27	708756,97	7034185,56	-3,91	-3,70
4	705458,25	7000629,42	705464,18	7000623,48	5,94	-5,94
5	705396,23	7018635,82	705401,14	7018631,32	4,91	-4,50
6	715429,76	7011907,21	715434,26	7011902,54	4,50	-4,67
7	686663,13	7025910,71	686668,95	7025914,79	5,82	4,09
8	678896,15	7035977,77	678892,18	7035973,01	-3,97	-4,76
9	680075,67	7037518,83	680069,99	7037513,48	-5,67	-5,35
10	690071,56	7028682,14	690065,74	7028678,70	-5,82	-3,44
11	695533,65	7030662,02	695529,24	7030658,84	-4,41	-3,18
12	701757,79	7044813,99	701751,17	7044807,11	-6,61	-6,88
13	709027,03	7006090,54	709023,33	7006086,87	-3,70	-3,67
14	707087,97	7002869,45	707082,26	7002864,16	-5,70	-5,29
15	712692,13	7001103,50	712696,09	7001107,73	3,97	4,23
16	692806,27	7020479,20	692802,63	7020484,76	-3,65	5,56
17	687367,39	7022044,20	687363,74	7022052,14	-3,65	7,94
18	692291,70	7025501,15	692287,73	7025496,65	-3,97	-4,50
19	709662,51	7019907,44	709657,37	7019902,65	-5,14	-4,79
20	712315,75	7029758,50	712309,02	7029765,11	-6,73	6,61

Tabela A.12 - Resumo das estatísticas de análise de precisão da ortoimagem TerraSAR-X.

	E (m)	N (m)
<b>Média Discrepância</b>	-1,74	-2,00
<b>Desvio Padrão</b>	4,85	4,70
<b>RMSE</b>	4,11	4,08

## APÊNDICE B

Tabela B.1 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR de 14/09/2008.

		Referência			Exatidão do Usuário
		Água	Não Água	Total	
Classificado	Água	28	5	33	0,85
	Não Água	0	67	67	1,00
	Total	28	72	100	
	Exatidão do Produtor	1,00	0,93		

Tabela B.2 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem FBD/PALSAR de 01/10/2008.

		Referência			Exatidão do Usuário
		Água	Não Água	Total	
Classificado	Água	27	10	37	0,73
	Não Água	0	63	63	1,00
	Total	27	73	100	
	Exatidão do Produtor	1,00	0,86		

Tabela B.3 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem ASAR.

		Referência			Exatidão do Usuário	
		Água	Não Água	Veg. Alagada		Total
Classificado	Água	29	5	0	34	0,85
	Não Água	0	23	6	29	0,79
	Veg. Alagada	0	1	31	32	0,97
	Total	29	29	37	95	
	Exatidão do Produtor	1,00	0,79	0,84		

Tabela B.4 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 Ascendente.

		Referência			Exatidão do Usuário	
		Água	Não Água	Veg. Alagada		Total
Classificado	Água	26	0	0	26	1,00
	Não Água	0	29	9	38	0,76
	Veg. Alagada	9	2	24	35	0,69
	Total	35	31	33	99	
	Exatidão do Produtor	0,74	0,94	0,73		

Tabela B.5 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem STD5/RST-2 Descendente.

		Referência			Total	Exatidão do Usuário
		Água	Não Água	Veg. Alagada		
Classificado	Água	20	0	2	22	0,91
	Não Água	1	23	10	34	0,68
	Veg. Alagada	7	2	33	42	0,79
	Total	28	25	45	98	
	Exatidão do Produtor	0,71	0,92	0,73		

Tabela B.6 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem TerraSAR-X.

		Referência			Total	Exatidão do Usuário
		Água	Não Água	Veg. Alagada		
Classificado	Água	23	0	0	23	1,00
	Não Água	0	30	6	36	0,83
	Veg. Alagada	2	4	35	41	0,85
	Total	25	34	41	100	
	Exatidão do Produtor	0,92	0,88	0,85		

Tabela B.7 – Matriz de confusão da classificação da ortoimagem FBS/PALSAR.

		Referência			Total	Exatidão do Usuário
		Água	Não Água	Veg. Alagada		
Classificado	Água	29	0	0	29	1,00
	Não Água	0	22	3	25	0,88
	Veg. Alagada	6	4	36	46	0,78
	Total	35	26	39	100	
	Exatidão do Produtor	0,83	0,85	0,92		

## APÊNDICE C

Tabela C.1 – Coordenadas planimétricas das cicatrizes de escorregamento mapeadas na ortoimagem TerraSAR-X e verificadas em campo. Sistema de Projeção: UTM. Datum: SAD 1969 Zona 22 Sul.

ID	Acerto	X	Y
1	SIM	707045,77	7028968,02
2	SIM	706103,85	7030044,88
3	SIM	704280,86	7031082,05
4	NÃO	704355,20	7033775,59
5	SIM	702872,17	7031677,18
6	SIM	703838,96	7034157,92
7	SIM	700327,93	7032573,06
8	NÃO	700460,22	7032909,08
9	NÃO	700566,06	7033091,65
10	NÃO	700333,22	7033467,36
11	SIM	701187,83	7032827,06
12	SIM	700929,88	7033951,73
13	NÃO	699892,71	7034962,44
14	SIM	701714,76	7036745,05
15	SIM	708567,48	7034961,75
16	SIM	704304,24	7035291,69
17	SIM	708336,50	7034148,69
18	NÃO	708225,07	7028011,17
19	NÃO	708139,21	7028398,44
20	NÃO	706944,11	7029697,58
21	SIM	705601,72	7030647,01
22	NÃO	705124,47	7030654,19
23	SIM	704043,48	7030598,00
24	SIM	703431,54	7033465,76
25	SIM	701687,63	7031465,25
26	NÃO	700471,78	7032490,54
27	SIM	700116,52	7032726,26
28	SIM	701436,48	7032405,63
29	SIM	701203,57	7031314,24
30	SIM	702838,53	7033579,35
31	SIM	701330,20	7034003,59
32	SIM	707906,20	7035686,01
33	NÃO	703958,03	7034404,33
34	NÃO	704465,58	7027040,28
35	NÃO	709420,13	7034628,88
36	NÃO	705997,36	7036227,23
37	NÃO	701802,88	7034164,84