

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEODÉSIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CARTOGRÁFICA

FELIPE GEREMIA NIEVINSKI

**Interferometria por
Radar de Abertura Sintética
(InSAR)**

Trabalho de conclusão apresentado
como requisito parcial para a obtenção
do título de Engenheiro Cartógrafo

Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza
Orientador

Porto Alegre, novembro de 2004

AGRADECIMENTOS

- À Universidade Técnica de Delft, Holanda, pela cedência do programa DORIS para processamento InSAR.
- À Agência Espacial Européia, pela cedência dos dados ENVISAT.
- Ao Dr. José Cláudio Mura, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela cedência dos dados SIR-C.
- Ao Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza, por todo o apoio e pela orientação.
- A todos os professores que me concederam bolsas durante o meu período de graduação.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	5
LISTA DE SÍMBOLOS	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Visão geral de InSAR	14
1.2 Objetivo geral	14
1.3 Objetivos específicos	14
1.4 Motivação	15
1.5 Organização e conteúdo deste relatório	15
2 INTERFEROMETRIA POR RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA	16
2.1 Histórico	16
2.2 Princípios de imageamento por radar	19
2.2.1 Terminologia	19
2.2.2 Radiação	22
2.2.3 Retro-espalhamento	22
2.2.4 Resolução na direção de alcance	23
2.2.5 Resolução na direção de azimute	24
2.3 Diferença de fase	26
2.3.1 Componentes da fase	26
2.3.2 Relação da diferença de fase com a diferença na distância percorrida pelos sinais	27
2.3.3 Cálculo da diferença de fase	28
2.3.4 Interferograma	29
2.4 Determinação da posição de alvos	29
2.4.1 Relação da diferença de fase com a posição do alvo e dos sensores	29
2.4.2 As equações de observação	32
2.4.3 Cálculo da posição do alvo	34
2.5 Determinação do deslocamento de alvos	35
2.5.1 Relação da diferença de fase com o deslocamento do alvo	35

2.5.2	Cálculo do deslocamento do alvo	37
2.6	Processamento InSAR	38
2.6.1	Processamento InSAR para geração de mapas de elevação	38
2.6.2	Processamento InSAR para geração de mapas de deformação	42
2.7	Limitações	43
2.7.1	Sensibilidade	43
2.7.2	Fontes de erros	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Dados	47
3.1.1	Dados ERS	47
3.1.2	Dados SIR-C	47
3.1.3	Dados ENVISAT	51
3.2	Programas	51
3.2.1	Operação do programa DORIS	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Processamento dos dados ERS	56
4.2	Processamento dos dados SIR-C	63
4.3	Processamento dos dados ENVISAT	63
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	82
	APÊNDICE A COMENTÁRIO SOBRE AS FONTES BIBLIOGRÁFICAS	84
	REFERÊNCIAS	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

InSAR Interferometria por Radar de Abertura Sintética

SAR Radar de Abertura Sintética

MDE Modelo Digital de Elevação

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	comprimento de onda
s	sinal complexo
s^*	conjugado do sinal complexo s
$\Re(s)$	parte real do sinal complexo s
$\Im(s)$	parte imaginária do sinal complexo s
φ	fase do sinal complexo s
φ^E	componente da fase φ devida à dispersão do sinal no elemento de resolução da superfície imageada
φ^V	componente da fase φ devida à distância percorrida pelo sinal
ϕ	diferença de fase
ϕ_p	valor principal da diferença de fase ϕ ; igual a ϕ modulo 2π
ϕ_{des}	valor principal da diferença de fase desenrolado
ρ	distância direta sensor–alvo; também chamada distância de alcance
$\Delta\rho$	diferença na distância de alcance ρ entre observações, devida ao deslocamento do alvo
$\delta\rho$	diferença na distância de alcance ρ entre observações, devida à paralaxe
A	sensor; amplitude do sinal complexo s
A_1	sensor principal
A_2	sensor secundário
\vec{P}	vetor posição do sensor
\vec{P}_1	vetor posição do sensor principal
\vec{P}_2	vetor posição do sensor secundário
\vec{B}	vetor linha de base entre os sensores, que vai de \vec{P}_1 para \vec{P}_2
B	comprimento do vetor linha de base \vec{B} ; $B \equiv \vec{B} $; em SAR, largura de banda utilizada para modulação do pulso de radar
\vec{l}	vetor de alcance do sensor, que vai de A para o alvo

\hat{l}	vetor unitário de alcance, que vai do sensor para o alvo. $\hat{l} \equiv \vec{l}/\rho$; também chamado vetor linha de visada
\vec{T}	vetor posição do alvo
α	ângulo que o vetor linha de base \vec{B} faz com a direção horizontal no sensor principal A_1
θ	ângulo que o vetor linha de visada \hat{l} faz com a direção vertical no sensor principal A_1
h	altura do sensor principal A_1 em relação a uma superfície de referência
z	altura do alvo em relação a mesma superfície de referência que a altura do sensor h
B_{\parallel}	componente da linha de base \vec{B} paralela à linha de visada \hat{l} ; $B_{\parallel} \equiv \vec{B} \cdot \hat{l}$
B_{\perp}	componente da linha de base \vec{B} perpendicular à linha de visada \hat{l} ; $B_{\perp} \equiv \sqrt{B_{\parallel}^2 + B^2}$
\vec{T}	vetor posição do alvo
\vec{D}	vetor deslocamento total do alvo entre observações
D	comprimento do vetor deslocamento \vec{D} do alvo; $D \equiv \vec{D} $; em SAR, largura física da antena do radar na direção de azimute
f_{Dop}	freqüência Doppler
\vec{v}	vetor velocidade da plataforma
M	imagem principal
S	imagem secundária
S'	imagem secundária registrada à principal
I	interferograma
γ	coerência
θ_V	largura do feixe de radar ao longo da direção vertical
θ_H	largura do feixe de radar ao longo da direção perpendicular à vertical

LISTA DE FIGURAS

2.1	Linha do tempo das missões orbitais de observação da Terra com SAR.	18
2.2	Geometria do imageamento por radar.	20
2.3	Direções do imageamento de um alvo por radar.	21
2.4	Resolução na direção de alcance direto do radar: dois objetos cujos ecos são separáveis.	23
2.5	Abertura sintética de um radar.	25
2.6	Aumento da abertura sintética de um radar para alvos a distâncias maiores.	26
2.7	Representação esquemática de duas imagens co-registradas.	29
2.8	Geometria da observação da diferença na distância percorrida pelo sinal – caso bi-dimensional (plano perpendicular à direção de azimute).	30
2.9	Esfera de alcance, em corte.	33
2.10	Cone de diferença de fase, em corte.	34
2.11	Intersecção das superfícies dadas pelas equações de observação, em corte.	35
2.12	Geometria do deslocamento de alvos.	36
2.13	Estimativa da magnitude do deslocamento completo a partir da sua direção suposta.	38
2.14	Fluxograma do processamento InSAR para geração de mapas de elevação.	39
2.15	Diferentes tipos de fase interferométrica: principal ($\phi_p = \phi_m$), desenrolado ($\phi_{des} = \phi_{unw}$), completa ($\phi = \phi_{top}$). Copiado de Rosen et al. (2000, p. 339).	41
2.16	Perfil de um interferograma e de seu correspondente desenrolado. Copiado de Mura (2003, p. 9).	42
2.17	Dois interferogramas da mesma região com comprimentos de linha de base perpendicular diferentes.	44
2.18	Variação nos perfis de MDEs da mesma região, devido a efeitos atmosféricos. Adaptado de Rocca, Prati e Ferretti (1997).	45
2.19	Variação na soma complexa do retorno dos alvos que compõem um elemento de resolução com a variação no ângulo de incidência. Adaptado de Rosen et al. (2000, p. 338).	46
3.1	Dados ERS – mapa da área de extensão das imagens.	48
3.2	Dados ERS – imagem principal.	49
3.3	Dados ERS – imagem secundária.	50
3.4	Dados ENVISAT – mapa da área de extensão das imagens.	52

3.5	Dados ENVISAT – imagem principal.	53
3.6	Dados ENVISAT – imagem secundária anterior ao terremoto.	53
3.7	Dados ENVISAT – imagem secundária posterior ao terremoto.	54
4.1	Dados ERS – transformação entre imagens.	59
4.2	Dados ERS – imagem secundária reamostrada para registrá-la à imagem principal.	60
4.3	Dados ERS – interferograma “bruto”.	61
4.4	Dados ERS – interferograma reamostrado com fator de visadas múltiplas $(l,p) = (5,1)$	61
4.5	Dados ERS – interferograma sintético da fase devida à forma elipsóidica da Terra.	61
4.6	Dados ERS – interferograma com fase devida à forma elipsóidica da Terra removida.	62
4.7	Dados ERS – interferograma filtrado por convolução espacial (janela de média móvel com largura de 3 pixels).	62
4.8	Dados ERS – imagem de coerência do interferograma.	62
4.9	Dados ERS – interferograma com fase desenrolada.	62
4.10	Dados ERS – altura dos pontos no sistema de coordenadas do radar (direções de alcance e de azimute).	62
4.11	Dados ERS – pontos resultantes da geo-codificação dos pixels.	63
4.12	Grade gerada por interpolação dos pontos geo-codificados	64
4.13	Grade em perspectiva	64
4.14	Dados ERS – Pontos observados a partir da linha de vôo e linha de visada do radar.	65
4.15	Dados ERS – Modelo de iluminação pelo radar. (A fonte de iluminação está a 107° de azimute (ângulo horário a partir do norte) e 67° de elevação.)	65
4.16	Dados ERS – diagrama de dispersão entre modelo de iluminação pelo radar e densidade de pontos geo-codificados.	66
4.17	Dados ENVISAT, par topográfico – deslocamento entre imagens.	67
4.18	Dados ENVISAT, par topográfico – resíduos do ajustamento do polinômio de transformação entre imagens (apenas amostras com coerência maior que 0,4; escala dos vetores em 1/1).	68
4.19	Dados ENVISAT, par topográfico – imagem secundária reamostrada para registrá-la à imagem principal.	69
4.20	Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma “bruto”.	70
4.21	Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma sintético da fase devida à forma elipsóidica da Terra.	71
4.22	Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma com fase devida à forma elipsóidica da Terra removida.	72
4.23	Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma filtrado por média móvel (com 5 pixels de largura).	73
4.24	Dados ENVISAT, par topográfico – coerência.	74
4.25	Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma desenrolado.	75
4.26	Dados ENVISAT, par de deformação – deslocamento entre imagens.	76

4.27	Dados ENVISAT, par de deformação – resíduos do ajustamento do polinômio de transformação entre imagens (apenas amostras com coerência maior que 0,4; escala dos vetores em 1/1).	76
4.28	Dados ENVISAT, par de deformação – interferograma sem componente devida à forma elipsóidica da Terra e filtrado por média móvel (com 5 pixels de largura).	77
4.29	Dados ENVISAT, par de deformação – coerência.	78
4.30	Dados ENVISAT: interferograma diferencial.	79
4.31	Dados ENVISAT: interferograma diferencial desenrolado.	80
4.32	Dados ENVISAT: recorte do interferograma diferencial.	81

LISTA DE TABELAS

2.1	Bandas de microondas.	22
3.1	Dados ERS – parâmetros em comum para as duas imagens.	47
3.2	Dados ERS – parâmetros da imagem principal.	48
3.3	Dados ERS – parâmetros da imagem secundária.	48
3.4	Dados ENVISAT – linhas de base perpendiculares entre pares das cenas da órbita descendente.	51
3.5	Dados ENVISAT – linhas de base perpendiculares entre pares das cenas da órbita ascendente.	51
3.6	Dados ENVISAT – parâmetros em comum para as imagens usadas.	51
3.7	Dados ENVISAT – parâmetros da imagem principal.	52
3.8	Dados ENVISAT – parâmetros da imagem secundária anterior ao ter- remoto.	52
3.9	Dados ENVISAT – parâmetros da imagem secundária posterior ao terremoto.	52
3.10	Exemplo de arquivo texto para entrada de parâmetros no programa DORIS.	55
4.1	Dados ERS – deslocamento entre imagens determinado com efemé- rides orbitais.	58
4.2	Dados ERS – deslocamento entre imagens determinado por correla- ção da magnitude – amostragem grosseira.	58
4.3	Dados ERS – parâmetros das funções ajustadas para transformação entre as imagens.	59

RESUMO

Este relatório apresenta o trabalho de graduação desenvolvido com o objetivo geral de entender a técnica de interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) para determinação da posição e deslocamento de alvos. Esta técnica tem despertado interesse devido à sua capacidade de gerar mapas de elevação através de um processo quase automático e mapas de deformação com sensibilidade até milimétrica, ambos com resolução de metros. O desenvolvimento deste trabalho incluiu a realização de uma revisão da literatura internacional sobre o assunto, a elaboração de um modelo do processamento InSAR na forma de fluxograma e o processamento interferométrico de um par de imagens SAR ERS1/2 e de três imagens ENVISAT. A principal conclusão deste trabalho é que a técnica de InSAR ainda precisa ser mais desenvolvida em instituições de pesquisa, antes que seu uso se torne comum na produção regular por empresas de mapeamento.

Palavras-chave: InSAR, SAR, radar, MDE.

Synthetic Aperture Radar Interferometry

ABSTRACT

This report presents the work developed as a graduation thesis with the general aim of understanding the technique of synthetic aperture radar interferometry (InSAR), as used for the determination of the position and displacement of targets. That technique has received attention due to its capability to generate elevation maps by a quasi-automatic process and deformation maps with milimetric sensibility, both with resolution in the order of meters. The development of this work included the review of international literature on that subject, the modeling of the InSAR processing in the form of a fluxogram, and the interferometric processing of a pair of ERS1/2 SAR images and of three ENVISAT images. The main conclusion of this work is that InSAR still needs to be developed further in research institutions, before its use becomes widespread in regular production by mapping companies.

Keywords: InSAR, SAR, radar, DEM.

1 INTRODUÇÃO

Esta parte do relatório é um resumo da proposta final deste trabalho, apresentada em 10 de setembro do corrente ano.

1.1 Visão geral de InSAR

A técnica InSAR é a técnica de interferometria aplicada a dados de radar. A interferometria utiliza o fenômeno de interferência de duas ondas eletro-magnéticas para medir distâncias através da diferença de fase das ondas. A diferença de fase é devida na maior parte à diferença na distância percorrida por cada onda. As distâncias assim medidas têm sensibilidade da ordem de frações do comprimento de onda utilizado – no caso do radar, até milímetros. As diferenças na distância percorrida podem ser invertidas para se obter medidas de elevações ou de deslocamentos, ambas muito úteis em ciências geodésicas. Conforme Rosen et al. (2000, p. 1), “[InSAR] transformou o sensoriamento remoto por radar de uma ciência essencialmente interpretativa em uma ferramenta quantitativa. . .”.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi entender a técnica InSAR para mapeamento de elevações e de deformações. Expresso na forma de uma pergunta a ser respondida, o problema resolvido nesse trabalho foi:

“Como processar interferometricamente imagens coletadas por um radar de abertura sintética para mapeamento de elevações e de deformações?”

1.3 Objetivos específicos

O objetivo geral do trabalho foi detalhado através dos seguintes objetivos específicos:

Revisão da literatura: é a ação que visa a obter conhecimento e entendimento sobre o tema de pesquisa escolhido, através da leitura crítica de textos publicados sobre o tema e da redação de um texto descrevendo o referencial teórico da pesquisa;

Modelagem do processo: trata-se da elaboração de um modelo descrevendo (graficamente, na forma de um fluxograma) o processamento InSAR, dividindo-o em módulos (passos, etapas, estágios, blocos), com a definição dos fluxos de dados entre eles;

Processamento InSAR: trata-se da realização de parte do processamento interferométrico de imagens de radar – é a parte prática/experimental deste trabalho.

1.4 Motivação

A motivação para este trabalho foi a missão do ônibus espacial *Endeavour* para mapeamento topográfico por radar (SRTM) (RABUS et al., 2003). Em fevereiro de 2000 aquela missão adquiriu dados em um voo de 11 dias, cobrindo toda a área da Terra entre 60°N e 57°S, e está produzindo através de InSAR um modelo digital de elevação (MDE) com extensão global e acurácia uniforme sem precedentes. A possibilidade de automatização quase completa no processo de geração do MDE foi a característica de InSAR que mais atraiu, por causa da possibilidade de, em certos casos, tornar obsoletas as técnicas de geração de MDE que requerem demasiada intervenção humana.

1.5 Organização e conteúdo deste relatório

A próxima parte deste relatório (seção 2) estabelece o referencial teórico do trabalho, que é a teoria de InSAR. Tal referencial é necessário para entender os materiais e métodos usados (seção 3), assim como os resultados obtidos, que são apresentados e discutidos na seção 4. A última seção (5) apresenta as conclusões deste trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

2 INTERFEROMETRIA POR RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

“Interferometria por Radar de Abertura Sintética” (InSAR, *Synthetic Aperture Radar Interferometry*, às vezes também IfSAR ou ISAR) compartilha das características das suas componentes, e por isso pode ser definida através da definição dessas componentes:

- “Interferometria” é a ciência aplicada de estudo e medição da interferência de ondas;
- “Radar de abertura sintética” é uma técnica de imageamento por radar que se vale do movimento a vante do veículo que carrega o radar, para com isso sintetizar o efeito de uma antena com abertura maior do que a real e obter uma melhor resolução.

Interferometria é uma técnica de metrologia com aplicações extremamente diversas em várias áreas da Ciência e Engenharia. Em Geodésia, é aplicada com sucesso atualmente para realizar levantamentos de precisão utilizando satélites artificiais de navegação (como p. ex. o *Global Positioning System*); também é empregada para determinar a orientação e escala da Terra utilizando sinais de rádio de astros distantes (técnica chamada VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*), permitindo com isso a definição, implantação e manutenção de sistemas de referência geodésicos modernos. Uma apresentação em separado sobre Interferometria, ainda que interessante, está bem fora do escopo desse trabalho, para manter seu foco reduzido.

As seções seguintes tratam em detalhe das características de InSAR. Primeiro é apresentado um breve histórico do desenvolvimento da técnica (seção 2.1), seguido de alguns princípios de imageamento por radar (2.2), necessários para entender InSAR. A seção seguinte é uma apresentação sobre vários aspectos da diferença de fase (2.3), que é uma quantidade fundamental em interferometria. Após são apresentados, com ênfase, o cálculo da posição (2.4) e deslocamento (2.5) de alvos e o processamento de dados em InSAR (2.6). Por último (2.7), é apresentado um resumo das limitações mais importantes que dificultam e até impedem a aplicação da técnica em certos casos.

2.1 Histórico

Registros históricos do desenvolvimento de InSAR podem ser encontrados em Massonnet (1997, p. 2–3), Rosen et al. (2000, p. 333–4), Gens e Genderen (1996, p. 1803–4), Hoen (2001, p. 6–7) e Mura (2003, p. 5).

Sucintamente, “InSAR é a síntese das técnicas convencionais de Radar de Abertura Sintética e de interferometria, que têm sido desenvolvidas há várias décadas em rádio-

astronomia” (ROSEN et al., 2000, p. 333). Exemplos do uso de InSAR em Astronomia são dados por Rogers e Ingalls (apud ROSEN et al., 2000, p. 333) para o planeta Vênus e Zisk (apud ROSEN et al., 2000, p. 333) para a Lua.

Ainda que o primeiro relato de aplicação de InSAR para mapeamento topográfico tenha sido feito já em 1974 por Graham, se passou mais de uma década antes que novas demonstrações fossem apresentadas (GENS; GENDEREN, 1996, p. 1803). Isso foi feito por pesquisadores do Laboratório de Propulsão a Jato do Instituto de Tecnologia da Califórnia (JPL/Caltech), usando dados aéreos (ZEBKER; GOLDSTEIN, 1986 apud ROSEN et al., 2000, p. 337) e orbitais (GOLDSTEIN; ZEBKER; WERNER, 1988 apud ROSEN et al., 2000, p. 337). Desenvolvimentos paralelos aconteciam no Centro Nacional Francês de Pesquisas Espaciais (CNES) (MASSONNET, 1985 apud MASSONNET, 1997, p. 1). Naquela época (década de 1980) havia poucos dados orbitais disponíveis, provenientes das curtas missões Seasat, SIR-A e SIR-B (veja figura 2.1).

Na década de 1990, com o lançamento do satélite europeu ERS-1, foi disponibilizada uma grande quantidade de dados adequados para InSAR, o que possibilitou que diversos grupos ao redor do planeta demonstrassem com sucesso diversas aplicações de InSAR (HOEN, 2001, p. 6), como p.ex. em terremotos, vulcões, subsidência do solo devido à extração de água ou petróleo, deslizamentos de terra e glaciologia (para uma revisão dessas aplicações, veja p.ex. Massonnet e Feigl (1998)).

Ainda na década de 1990, diversos artigos sobre aplicações de InSAR foram publicados em revistas científicas de público mais amplo, como *Nature* e *Science* – incluindo capa dessas revistas, como p.ex. Massonnet et al. (1993) – demonstrando o grande desenvolvimento que a técnica experimentava. Também nesse período teve início a série de *workshops* internacionais “FRINGE” (1996, 1999, 2003). No final daquela década, em 1998, Massonnet e Feigl afirmaram (p. 494):

“... o estado da arte da técnica está atualmente suficientemente alto, de forma que novas e empolgantes aplicações geofísicas já estão ao alcance, sem a necessidade de maiores desenvolvimentos [nas técnicas de] processamento. Nesse sentido, interferometria por radar para geofísica no final dos [anos] 1990s parece estar quase na mesma posição que as imagens ópticas orbitais (como p.ex., SPOT) estavam no final dos 1980s ou que as técnicas de levantamento geodésico espaciais (como p.ex., GPS) estavam no início dos 1990s”.

Em 1999, durante a Assembléia Geral da União Internacional de Geodésia e Geofísica, a Associação Internacional de Geodésia (AIG) estabeleceu o Grupo de Estudos Especiais 2.183 em *Tecnologia de Interferometria por Radar*, chefiado por Ramón Hanssen; especulo que isso tenha marcando o reconhecimento da introdução de InSAR como mais uma técnica do arsenal geodésico.

Na primeira metade da década de 2000, o satélite europeu ENVISAT foi lançado, dando continuidade ao fornecimento contínuo de dados para InSAR estabelecido pelos satélites ERS-1 e ERS-2. Um evento que contribuiu significativamente para a ampliação da comunidade interessada em InSAR nesse período foi a missão do ônibus espacial *Endeavour* para mapeamento topográfico por radar (SRTM) (RABUS et al., 2003), que está produzindo através de InSAR um modelo digital de elevação com extensão global e acurácia uniforme sem precedentes.

Para o período a partir de 2005, estão planejadas novas missões orbitais (veja a figura 2.1), capazes de coletar dados otimizados para InSAR. Um sistema orbital dedicado exclusivamente a InSAR é desejado pela comunidade científica (Zebker (2000, p. 49), Rosen

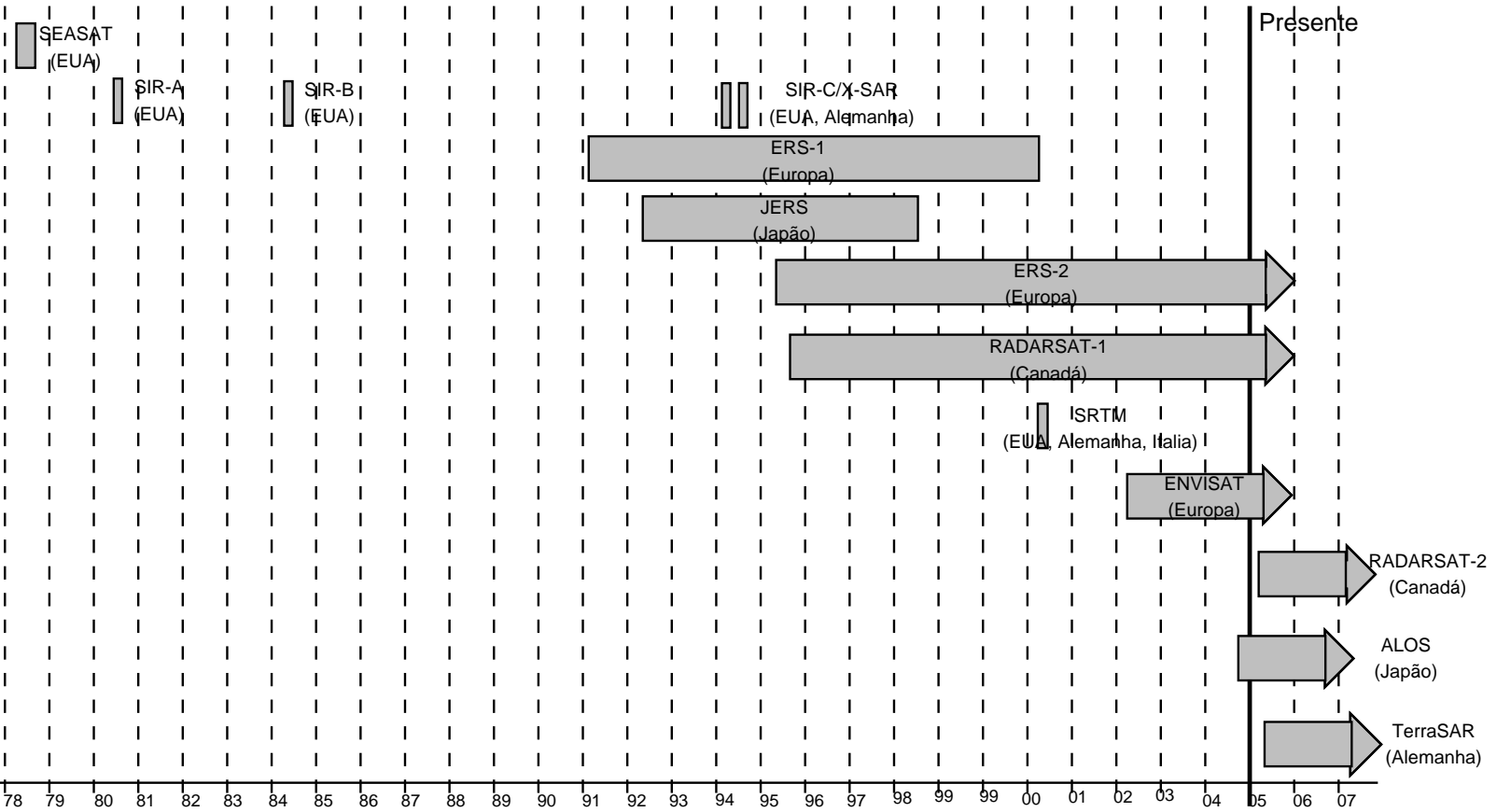


Figura 2.1: Linha do tempo das missões orbitais de observação da Terra com SAR. As missões com setas na ponta estão em andamento ou são planejadas para o futuro. Adaptado de Hoen (2001, p. 5), com dados sobre os anos 2000 e posteriores atualizados a partir de Bamler et al. (2003).

et al. (2000, p. 357)), mas ainda não está previsto. “Para além dessa geração [de satélites] que está por vir, podemos esperar satélites dedicados para *imageamento geodésico* [grifo meu], os equivalentes em Radar ao GPS” (BÜRGMANN; ROSEN; FIELDING, 2000, p. 203).

2.2 Princípios de imageamento por radar

Radar de abertura sintética¹ é uma técnica de imageamento *ativa*, i.e., que fornece a sua própria iluminação, funcionando portanto dia e noite, independente da luz do Sol. A iluminação é feita utilizando radiação de *microondas* (ao invés de, p.ex., radiação visível), cujo comprimento de onda permite-a atravessar nuvens e tempestades, funcionando portanto independente também das condições atmosféricas. A radiação utilizada por radares de abertura sintética é *coerente*, i.e., constituída de componentes com um mesmo comprimento de onda, mesmo plano de vibração (polarização) e diferença de fase constante, sendo portanto passível de sofrer interferência.

A seqüência de funcionamento de um radar imageador é basicamente a seguinte:

1. a antena transmite um pulso de radiação em direção ao solo;
2. quando o pulso atinge o solo ele se espalha em todas as direções;
3. uma porção desse espalhamento retorna na direção do radar, sendo chamado portanto *retro-espalhamento*;
4. a antena capta o sinal de retro-espalhamento, registrando sua amplitude, fase, polarização² e tempo de retorno;
5. os sinais captados são posteriormente processados, em conjunto, para formar uma imagem da superfície imageada.

Nas subseções seguintes veremos alguns detalhes importantes do funcionamento do radar imageador, mais especificamente do radar de visada lateral.

2.2.1 Terminologia

As figuras 2.2(a), 2.2(b) e 2.2.1 serão usadas para descrever os principais pontos, direções e ângulos no imageamento por radar de visada lateral. Os termos citados pela primeira vez no texto abaixo são enfatizados com formatação em *itálico*. São apresentados os nomes equivalentes em inglês de alguns termos que costumam ser usados em inglês na literatura brasileira³.

O radar fica instalado em uma *plataforma*, aérea ou orbital, que tem uma trajetória acima do solo e acima de uma superfície de referência da Terra (normalmente para essa superfície é adotado um elipsóide ou o geóide). A trajetória da plataforma forma a sua *linha de vôo* (em inglês: *flight track*), que tem uma projeção sobre a superfície de referência (em inglês: *ground track*). Essa projeção da linha de vôo, por sua vez, tem definido nos pontos sobre ela uma *direção vertical*, normal à superfície de referência, que contém um

¹Esta seção é baseada em Curlander e McDonough (1991), Elachi (1988) e Sandwell (2002).

²A polarização não é registrada explicitamente, porque o radar recebe apenas em certas polarizações fixas (como p.ex., horizontal ou vertical)

³A maioria das traduções foi baseada no glossário inglês-francês mantido pelo Centro Canadense de Sensoriamento Remoto (CCRS, 2004).

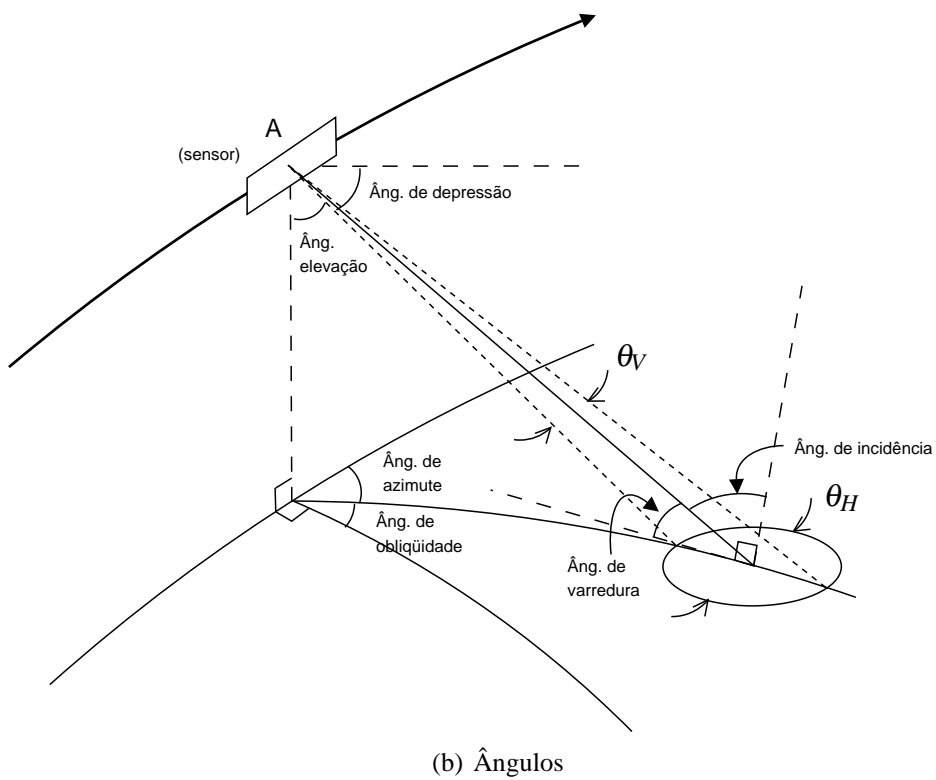
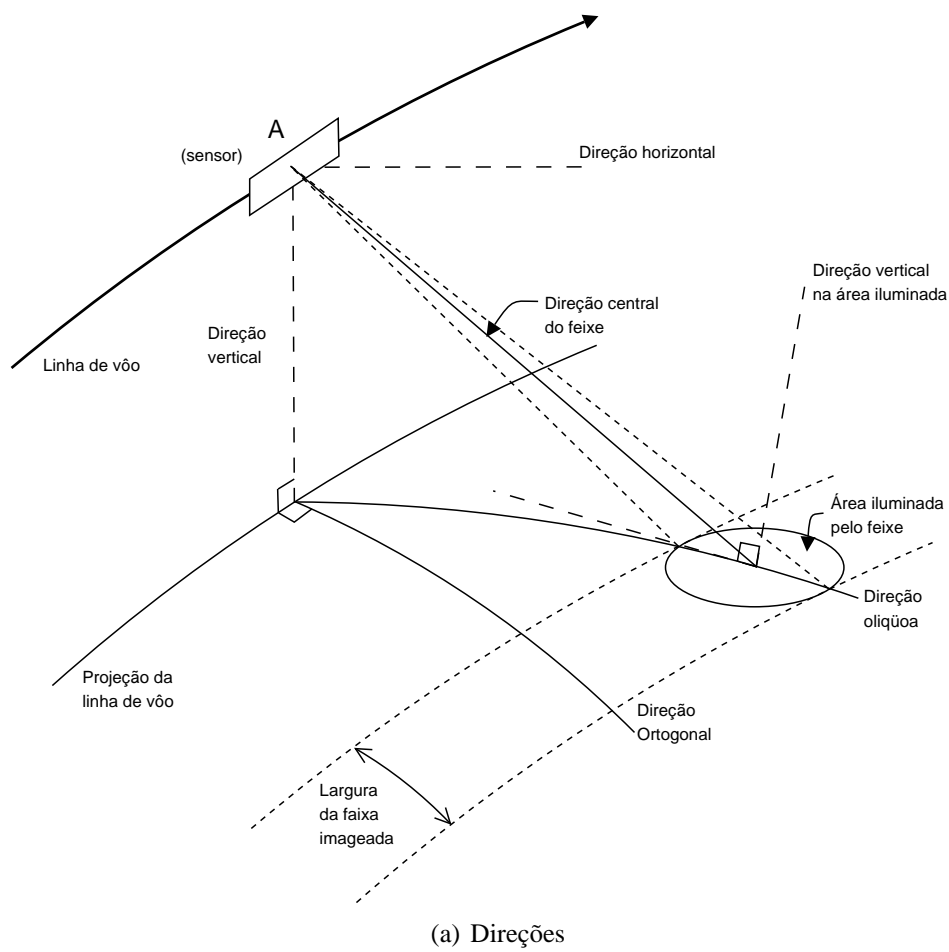


Figura 2.2: Geometria do imageamento por radar.

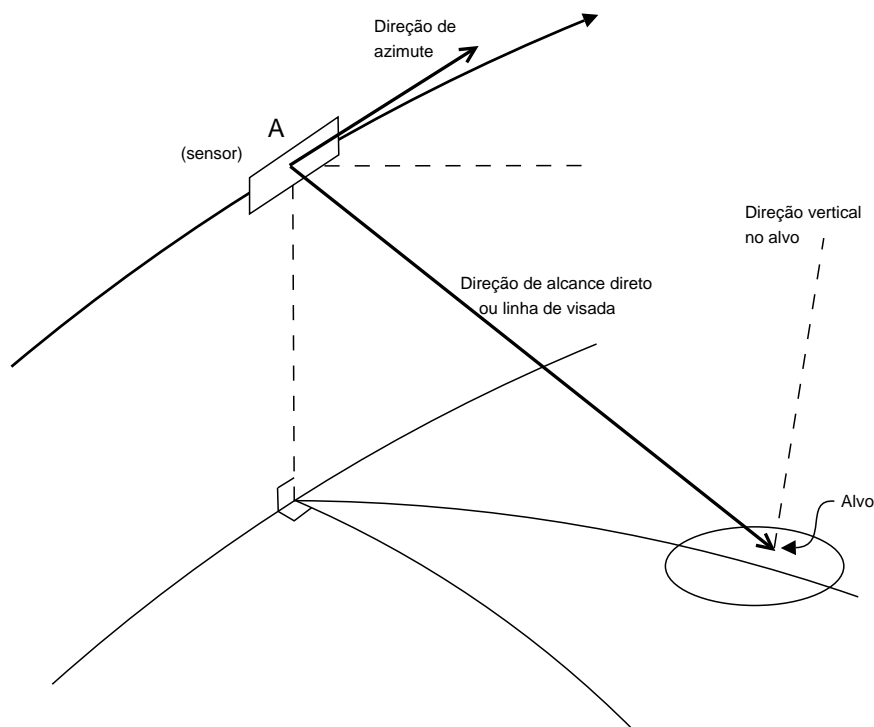


Figura 2.3: Direções do imageamento de um alvo por radar.

ponto correspondente na linha de vôo, além de uma *direção perpendicular* à ela, sobre a superfície de referência (em inglês: *broadside direction*).

O radar emite a radiação como um feixe. A *direção central* de tal feixe fica determinada por dois ângulos: um ângulo horizontal, em relação à direção perpendicular à projeção da linha de vôo, chamado *ângulo de obliquidade* (em inglês: *squint angle*) e um ângulo vertical, chamado *ângulo de elevação* ou *de visada* (em inglês: *elevation* ou *look angle*). Complementares a esses dois ângulos são definidos, respectivamente, o *ângulo de depressão* e o *ângulo de azimute*. Tal feixe tem uma abertura, que também fica determinada por dois ângulos: um ângulo de abertura vertical θ_V , no plano que contém as direções central do feixe e vertical, e um ângulo θ_H , no plano que contém a direção central ao feixe e é perpendicular ao plano anterior.

Sob a área iluminada pelo feixe, é definida uma direção vertical na intersecção da direção central do feixe com a superfície de referência. Note que como a superfície de referência não é plana (p.ex., a superfície do elipsóide é curva), as verticais no sensor e em um alvo sob o feixe *não são* paralelas. O ângulo entre essas duas direções é chamado *ângulo de incidência* (em inglês: *incidence angle*), e o seu complemento *ângulo de varredura* (em inglês: *grazing angle*).

Para um alvo em uma posição qualquer sob o feixe de iluminação do radar, podemos definir uma *direção de alcance direto*⁴ do radar ao alvo (em inglês: *slant range* ou *across-track direction*) e uma *direção de azimute* (em inglês: *azimuth* ou *along-track direction*), tangente à linha de vôo da plataforma. Tais direções são de fundamental importância porque corresponderão, respectivamente, à direção das linhas e à direção das colunas na imagem produzida pelo radar. Também podemos definir para o alvo ângulos idênticos

⁴A projeção da direção de alcance direto sobre a superfície de referência (em inglês: *ground range*) também costuma ser definida. Entretanto, em InSAR é usada predominantemente a direção de alcance direto.

Nome	Comprimento de onda λ (cm)	Frequência f (GHz)
K	0,83 – 2,75	36 – 10,9
X	2,75 – 5,21	10,9 – 5,75
C	5,21 – 7,69	5,75 – 3,9
S	9,69 – 19,4	3,9 – 1,55
L	19,4 – 76,9	1,55 – 0,39
P	76,9 – 133	0,39 – 0,225

Tabela 2.1: Bandas de microondas.

aos definidos para a direção central do feixe, como p.ex., âng. de elevação, âng. de azimute e âng. de incidência. Note que, como a direção de alcance varia para cada alvo sob o feixe, também variam os ângulos correspondentes. Claramente, a variação é menor quanto maior a altura da plataforma em relação à superfície de referência, quanto menor a largura vertical do feixe e quanto menor o ângulo de obliquidade da direção central do feixe.

2.2.2 Radiação

O radar utiliza uma radiação eletromagnética denominada genericamente *microonda*. Trata-se da região do espectro eletromagnético compreendida entre 225 MHz e 36 GHz.

Sensores de radar são construídos para responder a um intervalo espectral estreito dentro da região de microondas do espectro eletromagnético. As principais bandas de microondas são listadas na tabela 2.1.

2.2.3 Retro-espalhamento

Ao atingir um alvo, a radiação emitida pelo radar é espalhada em todas as direções. Uma pequena parte retorna na direção do sensor, e é chamado portanto de retro-espalhamento. Os principais fatores que definem o retro-espalhamento são o ângulo de incidência, a rugosidade da superfície e a constante dielétrica do alvo.

A intensidade do retro-espalhamento diminui sensivelmente à medida que o ângulo de incidência aumenta. O ângulo de incidência *local*, que é formado entre a direção normal *ao relevo* e a direção de visada, tem a mesma influência sobre a intensidade do retro-espalhamento.

O retro-espalhamento aumenta à medida que a rugosidade da superfície imageada aumenta. A rugosidade (e a própria superfície imageada) é função do comprimento de onda da radiação utilizada. P.ex., imageando uma floresta, enquanto que a radiação da banda X ($2,5 \text{ cm} < \lambda < 5,5 \text{ cm}$) é sensível às folhas, a da banda L ($19 \text{ cm} < \lambda < 77 \text{ cm}$) é sensível apenas aos troncos das árvores.

Um corpo com alta constante dielétrica é um bom refletor de microondas. A água tem constante dielétrica em torno de 80, enquanto que a terra seca tem entre 3 e 8. Então, p.ex., quando a lâmina d'água está calma e assim o ângulo de incidência local é grande, a radiação é quase toda refletida para longe do radar e portanto a água aparece muito escura na imagem de radar. Entretanto, quando a lâmina d'água está agitada, em certas regiões o ângulo de incidência local é pequeno e a radiação nessas regiões é refletida quase toda de volta para o radar, e portanto essas regiões aparecem muito claras.

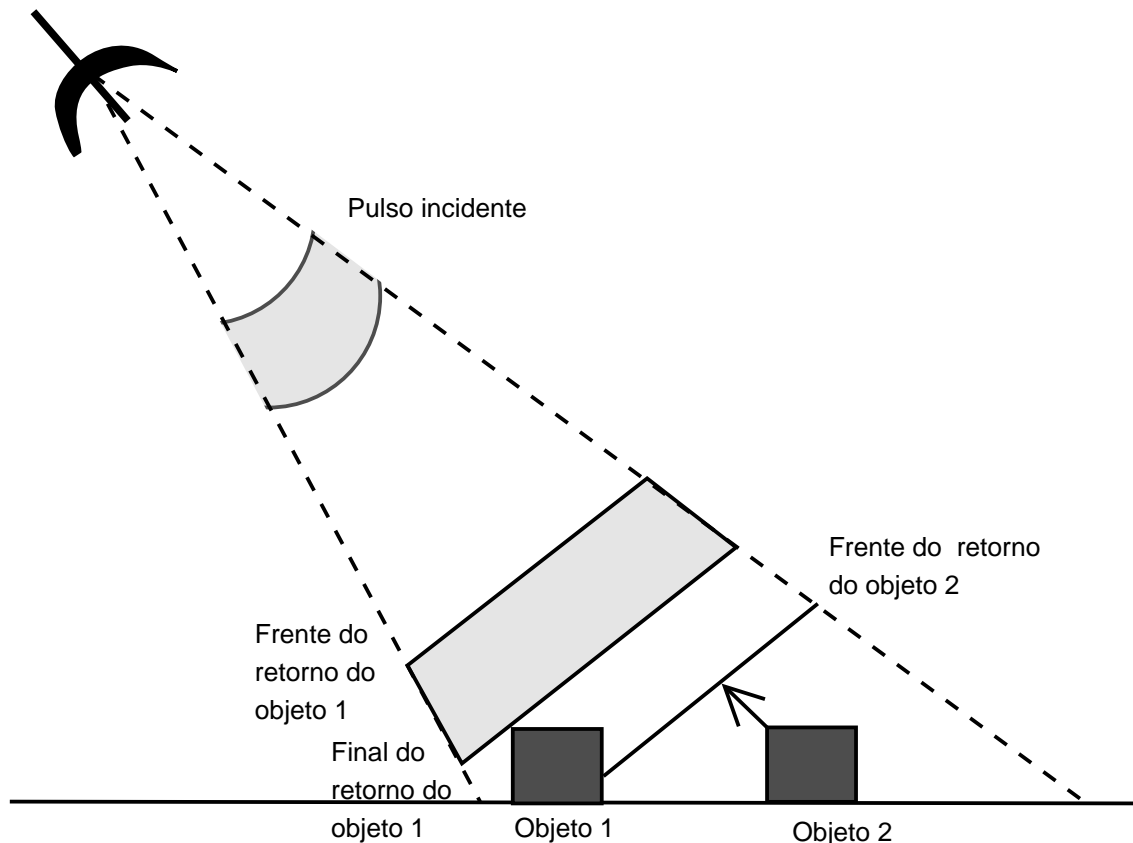


Figura 2.4: Resolução na direção de alcance direto do radar: dois objetos cujos ecos são separáveis.

2.2.4 Resolução na direção de alcance

A resolução de um radar na direção de alcance (direto) é a capacidade do radar em discriminar dois objetos nessa direção, e é medida pela menor distância entre dois objetos separáveis pelo radar. Seja τ a duração de um pulso de radiação e c a velocidade de propagação do sinal (velocidade da luz); então o comprimento de um pulso na direção de alcance é $c\tau$ e a resolução nessa direção é

$$\rho_R = \frac{c\tau}{2}. \quad (2.1)$$

Isto se torna evidente considerando a figura 2.4. O retorno proveniente do objeto 1 deixa completamente este objeto antes que a frente do retorno proveniente do objeto 2 alcance-o, e portanto os retornos dos dois objetos são separáveis.

Assim, a resolução na direção de alcance é diretamente proporcional à duração τ do pulso. Para aumentar essa resolução, na prática recorre-se a uma codificação do pulso no domínio da frequência, ao invés de diminuir τ . Desta forma, ρ_R pode ser expressa como

$$\rho_R \approx \frac{c}{2B} \quad (2.2)$$

onde B é a largura de banda utilizada na modulação em frequência do pulso. P.ex., o sensor ERS-2 tem $\tau = 37\mu s$, o que criaria um pulso com comprimento de 5,5 km; modulando o pulso utilizando $B = 15,6\text{MHz}$, este sensor obtém uma resolução de cerca de 10 m na direção de alcance direto.

Todos os tipos de radares imageadores, de abertura real ou sintética, resolvem os alvos na direção de alcance da mesma maneira. O que diferencia os radares de abertura sintética é a forma de aumentar a resolução na direção de azimute (CURLANDER; MCDO-NOUGH, 1991, p.16).

2.2.5 Resolução na direção de azimute

Vamos explicar rapidamente o funcionamento do radar de abertura real para que as vantagens do radar de abertura sintética fiquem mais evidentes.

2.2.5.1 Radar de abertura real

No radar de abertura real, o feixe é estreito na direção de azimute. É importante mantê-lo assim porque a resolução na direção de azimute depende diretamente desta largura de feixe (θ_H), que é aproximadamente:

$$\theta_H \approx \frac{0,89\lambda}{D}, \quad (2.3)$$

onde D é o comprimento (físico) da antena na direção de azimute e 0,89 é uma constante que depende da antena. Dois alvos são separáveis nessa direção se eles não estiverem sob o feixe ao mesmo tempo. Assim, a resolução em azimute é simplesmente a largura do feixe (em radianos) multiplicada pela distância na direção de alcance direto (ρ):

$$(\text{Resolução em azimute}) = \rho \theta_H. \quad (2.4)$$

Nota-se que a resolução degrada à medida que a distância direta ao alvo aumenta dentro da faixa imageada.

As limitações da resolução em azimute para radares de abertura real são severas. Primeiro, é necessário uma antena longa. Segundo, a resolução não é uniforme dentro de uma linha da imagem, degradando à medida que a distância ao alvo aumenta. Terceiro, para plataformas em alturas orbitais, até as menores distâncias diretas aos alvos são grandes demais (p.ex., mesmo em órbitas baixas, como 300km e com uma abertura de feixe θ_H de 1,5 miliradianos, a resolução em azimute seria cerca de 600m). Tais limitações inviabilizam o uso desse tipo de radar em plataformas orbitais.

2.2.5.2 Radar de abertura sintética (SAR)

Sensores SAR não tentam melhorar a resolução em azimute transmitindo feixes mais estreitos. Ao invés disso, a técnica de SAR usa feixes largos e longos tempos de exposição. Mas ao contrário do que acontece em radares de abertura real, em SAR um feixe mais largo *melhora* a resolução, uma vez que a técnica de SAR usa-o para aumentar o comprimento da abertura efetiva, se valendo do deslocamento Doppler presente na frequência dos sinais de retorno.

O movimento a vante da plataforma durante o imageamento resulta em um deslocamento Doppler na frequência da radiação retornada. Há um aumento na frequência do retorno de alvos que estão na parte dianteira do feixe e uma diminuição na frequência do retorno proveniente de alvos que estão na parte traseira do feixe. Além disso, o deslocamento Doppler será maior para alvos com maior velocidade (radial) em relação ao radar, chegando a zero no ponto de maior aproximação. Assim, dois alvos sob o feixe ao mesmo tempo mas em posições diferentes ao longo da direção de azimute terão retornos com frequência diferente e poderão ser resolvidos pelo radar de abertura sintética.

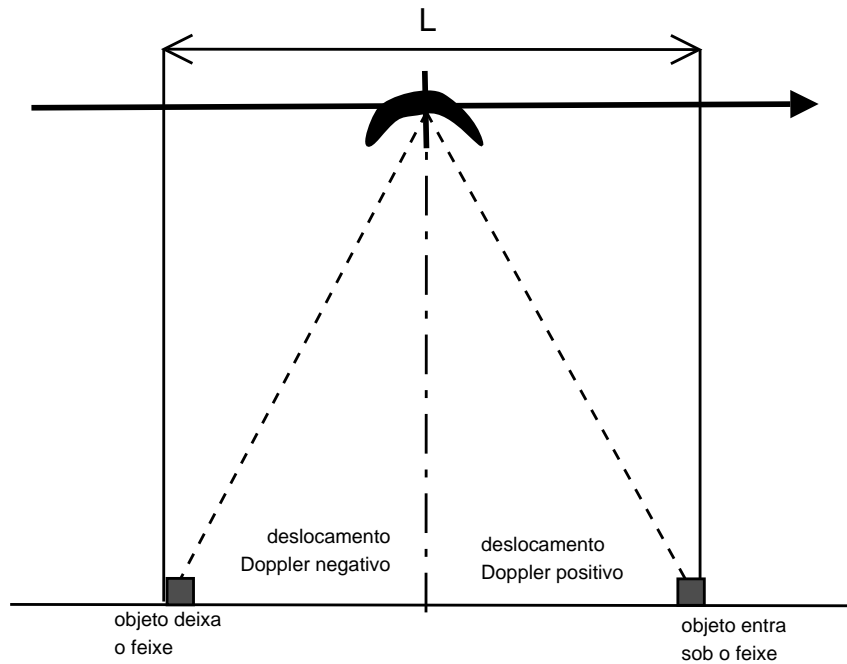


Figura 2.5: Abertura sintética de um radar.

A resolução na direção de azimute em um SAR é dada por

$$\rho_{Az} = \rho \theta_{H,S} \quad (2.5)$$

onde $\theta_{H,S}$ é a largura sintética do feixe, dada por

$$\theta_{H,S} \approx \frac{\lambda 0,89}{2L \sin \alpha_{Dop}}; \quad (2.6)$$

L é a abertura sintética e α_{Dop} é o ângulo (escolhido arbitrariamente) entre a direção de alcance direto ao alvo e o vetor velocidade da plataforma, chamado ângulo Doppler.

É comum entre os sistemas SAR transmitir o feixe perpendicular à linha de voo, em uma configuração chamada *strip-map* SAR. Nesse caso, L é dado por

$$L = \rho \theta_H \quad (2.7)$$

onde θ_H é a abertura real do radar. A resolução em azimute fica, então:

$$\rho_{Az} = \frac{D}{2 \sin \alpha_{Dop}} \quad (2.8)$$

Finalmente, considerando o caso em que $\alpha_{Dop} = 90^\circ$, obtemos

$$\rho_{Az} = \frac{D}{2} \quad (2.9)$$

As duas últimas fórmulas têm como característica notável não dependerem da distância do sensor ao solo. A resolução em azimute em *strip-map* SAR não degrada com a distância porque o comprimento da abertura sintética aumenta naturalmente para alvos a distâncias maiores (veja a figura 2.6). Tais alvos são iluminados por mais tempo, e portanto por aberturas sintéticas mais longas.

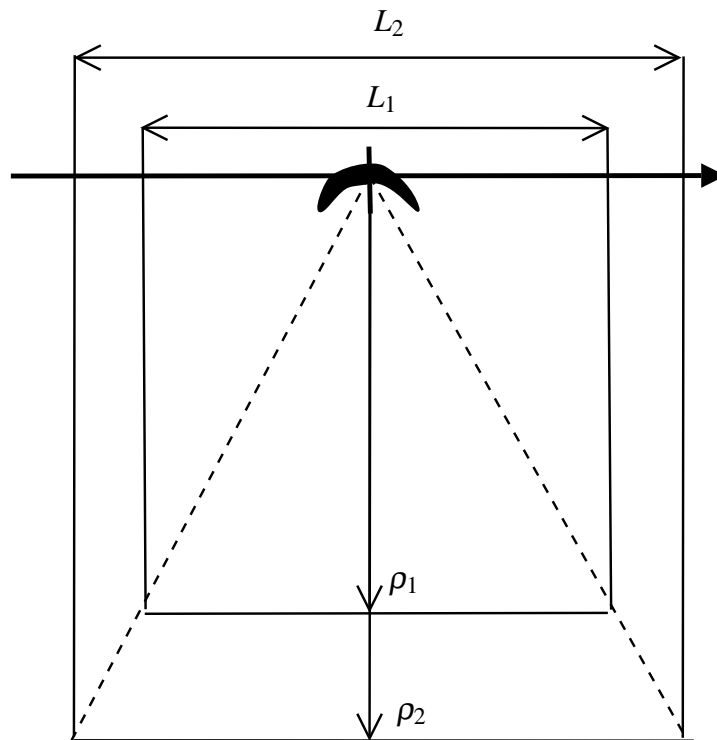


Figura 2.6: Aumento da abertura sintética de um radar para alvos a distâncias maiores.

2.3 Diferença de fase

A medida fundamental em InSAR é a *diferença de fase*, também chamada *fase interferométrica*, denotada por ϕ . Veremos abaixo como a diferença de fase é calculada a partir das observações que o radar fornece, e a relação entre diferença de fase e a distância percorrida pelos sinais de radar⁵.

2.3.1 Componentes da fase

Podemos supor (ZEBKER, 2000, p. 55) que a fase ϕ do sinal que um SAR fornece é igual a duas partes,

$$\phi = \phi^V + \phi^E;$$

o primeiro termo ϕ^V representa a propagação do sinal e é proporcional à distância de ida e volta (sensor–alvo–sensor) percorrida pelo sinal; o segundo termo ϕ^E representa a dispersão do sinal devido a sua interação com um elemento de resolução no solo.

A fase de uma imagem de radar é aleatória espacialmente e se parece com ruído (MASSONNET; FEIGL, 1998, p. 36), devido na maior parte à componente ϕ^E da fase. Mas se tal componente não muda entre duas observações ou, dito de outra forma, se o elemento de resolução se comporta da mesma maneira (i.e., produz o mesmo retro-espalhamento com fase ϕ^E) para dois sinais observados s_1 e s_2 , então diferenciando a fase ϕ_1 e ϕ_2 dos dois

⁵A notação adotada neste trabalho é baseada na notação usada por Rosen et al. (2000). As diferenças são: o nosso $\Delta\rho$ corresponde ao $\delta\rho_{\text{disp}}$ deles, da forma que Zebker et al. (1994) usa; os nossos ϕ^E e ϕ^V não existem naquele trabalho; os ϕ_{top} , ϕ_m , ϕ_{unw} deles correspondem, respectivamente, aos nossos ϕ , ϕ_p , ϕ_{des} .

sinais,

$$\begin{aligned}\phi &= \varphi_1 - \varphi_2 \\ &= (\varphi_1^V + \varphi^E) - (\varphi_2^V + \varphi^E) \\ &= \varphi_1^V - \varphi_2^V\end{aligned}$$

removemos a dependência da fase em relação ao mecanismo de dispersão que acontece no solo e obtemos uma quantidade que depende (ignorando outras componentes da fase) apenas na diferença da distância percorrida pelos dois sinais.

2.3.2 Relação da diferença de fase com a diferença na distância percorrida pelos sinais

Seja a distância sensor–alvo em cada observação i denotada por ρ_i ; a distância de ida e volta (sensor–alvo–sensor) percorrida pelo sinal em cada observação⁶ é dada por $2\rho_i$. Então a componente φ_i^V da fase pode ser expressa como

$$\varphi_i^V = -\frac{2\rho_i}{\lambda}2\pi$$

onde o sinal negativo segue a convenção de Rosen et al. (2000, p. 337), a fração dá a distância em número de comprimentos de onda e o fator 2π converte tal medida adimensional em radianos. A diferença de fase ϕ pode ser reescrita como

$$\begin{aligned}\phi &= \varphi_1^V - \varphi_2^V \\ &= \left(-\frac{2\rho_1}{\lambda}2\pi\right) - \left(-\frac{2\rho_2}{\lambda}2\pi\right) \\ &= \frac{2(-\rho_1 + \rho_2)}{\lambda}2\pi \\ &= 4\pi\frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\lambda}\end{aligned}\tag{2.10}$$

Se as duas observações a um mesmo alvo são realizadas a partir de exatamente a mesma posição, então podemos supor que a distância percorrida pelos sinais é a mesma ($\rho_1 = \rho_2$) e, pela eq. (2.10), a diferença de fase é zero ($\phi = 0$). Entretanto, se o alvo sofrer um deslocamento durante o período entre as observações, então a distância percorrida pelos sinais será diferente ($\rho_1 \neq \rho_2$) e a diferença de fase não será mais zero ($\phi \neq 0$). Denotando por $\Delta\rho$ a componente desse deslocamento na direção da linha de visada do radar, expressamos a distância percorrida na segunda observação como

$$\rho_2 = \rho_1 - \Delta\rho,$$

a diferença na distância percorrida como

$$\begin{aligned}\rho_2 - \rho_1 &= (\rho_1 - \Delta\rho) - \rho_1 \\ &= -\Delta\rho,\end{aligned}$$

e a diferença de fase como

$$\phi = -4\pi\frac{\Delta\rho}{\lambda}.\tag{2.11}$$

⁶Supomos que cada observação é obtida por uma antena que emite e recebe; em outras configurações, apenas uma antena emite e as duas recebem.

Se as duas observações a um mesmo alvo são realizadas em posições diferentes (mas próximas), então a distância percorrida pelos sinais será diferente. Mesmo na falta de um deslocamento real (i.e., $\Delta\rho = 0$), observa-se um deslocamento aparente (i.e., devido à paralaxe), denotado por $\delta\rho$, que depende da posição e direção de visada e da altura do alvo. Assim, nesse caso a distância percorrida na segunda observação é

$$\rho_2 = \rho_1 - \delta\rho - \Delta\rho,$$

a diferença na distância percorrida é

$$\begin{aligned}\rho_2 - \rho_1 &= (\rho_1 - \delta\rho - \Delta\rho) - \rho_1 \\ &= -(\delta\rho + \Delta\rho),\end{aligned}$$

e a diferença de fase é

$$\boxed{\phi = -4\pi \frac{(\delta\rho + \Delta\rho)}{\lambda}}. \quad (2.12)$$

2.3.3 Cálculo da diferença de fase

Tendo dois sinais complexos (i.e., com partes real \Re e imaginária \Im ou, de forma equivalente, com amplitude A e fase φ) s_1 e s_2 , a diferença de fase ϕ entre eles é obtida simplesmente por

$$\begin{aligned}\phi &= \varphi(s_1) - \varphi(s_2) \\ &= \varphi_1 - \varphi_2\end{aligned}$$

ou, de forma equivalente⁷, por

$$\phi = \varphi(s_1 s_2^*)$$

onde s_2^* denota o conjugado complexo⁸ de s_2 . A segunda forma é a normalmente empregada no processamento de dados em massa, quando os dados estão no formato (\Re, \Im) , porque envolve apenas uma chamada à função $\arctan()$, i.e.:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Im(s_1 s_2^*)}{\Re(s_1 s_2^*)}\right)$$

ao invés de

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Im(s_1)}{\Re(s_1)}\right) - \arctan\left(\frac{\Im(s_2)}{\Re(s_2)}\right)$$

2.3.3.1 Determinação da fase absoluta

É importante salientar que apenas o valor principal ϕ_p da fase absoluta φ é medido por um radar de abertura sintética, e da mesma forma para a fase interferométrica ou diferença de fase ϕ_p e ϕ . O valor principal ϕ_p corresponde à fase completa ϕ modulo 2π ⁹. Portanto ϕ_p tem valores no intervalo $[0, 2\pi)$, enquanto que a diferença de fase completa, proporcional à diferença na distância percorrida pelos sinais, pode ser igual a muitos múltiplos de 2π . Na seção 2.6 são apresentadas as duas operações necessárias para determinar ϕ a partir de ϕ_p : desenrolamento de fase e resolução da ambigüidade inteira.

⁷A equivalência pode ser demonstrada usando duas identidades trigonométricas, $\arctan(x) = -\arctan(-x)$ e $\arctan(x) + \arctan(y) = \arctan((x+y)/(1-xy))$.

⁸O conjugado de um número complexo s é dado por $s^* = \Re(s) - \Im(s)i$, onde $i = \sqrt{-1}$.

⁹A operação matemática m modulo n retorna o resto da divisão de m por n . P.ex., 2,5 modulo 2 = 0,5; 3 modulo 2 = 1; 4 modulo 2 = 0.

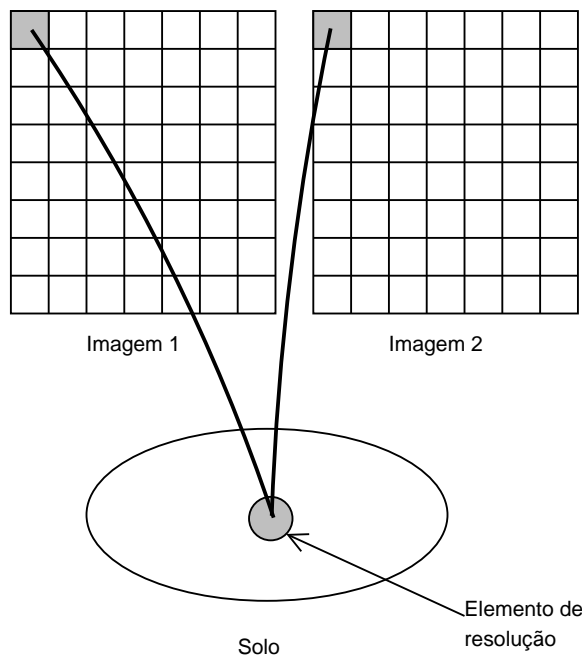


Figura 2.7: Representação esquemática de duas imagens co-registradas.

2.3.4 Interferograma

Se tivermos duas imagens cujos elementos ou pixels descrevem o sinal complexo correspondente a elementos de resolução da superfície imageada (p.ex., solo), e as duas imagens estiverem co-registradas (i.e., pixels na mesma posição nas duas imagens descrevem o mesmo elemento de resolução no solo – veja a figura 2.7), então a imagem resultado da diferença de fase, pixel a pixel, entre as duas imagens é chamada *interferograma*.

A apresentação usual de interferogramas usa “... uma série de bandas coloridas, que visam a assemelhar-se com as franjas de interferência produzidas [pela luz visível] em um filme delgado de sabão ou de óleo [sobre a água ou no ar].” (MASSONNET, 1997, p. 2).

2.4 Determinação da posição de alvos

Uma única imagem SAR permite determinar a posição de alvos em duas dimensões. InSAR permite determinar a terceira dimensão da posição dos alvos. Dito de outra forma, a posição dos alvos é determinada por três coordenadas; para obter o valor de tais incógnitas é preciso pelo menos três equações (linearmente independentes) que relacionem as coordenadas com as observações. SAR fornece duas equações e InSAR fornece uma terceira.

Apresentaremos primeiro a equação fornecida por InSAR, e após as três equações de observação juntas.

2.4.1 Relação da diferença de fase com a posição do alvo e dos sensores

Queremos obter uma expressão para a diferença de fase em termos da posição do alvo e do sensor. Isso será feito por intermédio da relação (2.12) entre diferença de fase e diferença na distância percorrida pelos sinais ($\delta\rho + \Delta\rho$), obtida anteriormente. Uma vez obtida tal expressão e conhecendo a posição do sensor, poderemos invertê-la para, junto com as duas equações do SAR, obter a posição do alvo, que é a medida desejada. Essa

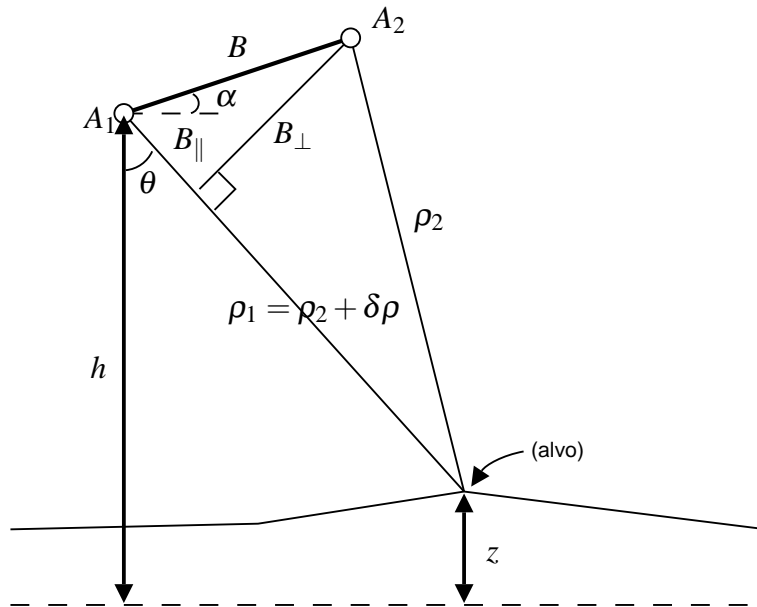


Figura 2.8: Geometria da observação da diferença na distância percorrida pelo sinal – caso bi-dimensional (plano perpendicular à direção de azimute).

inversão será feita na seção posterior.

Veremos primeiro um caso mais simples, bi-dimensional. Depois veremos um caso mais realista, tri-dimensional.

Na determinação da posição de alvos, supomos que não houve deslocamento do alvo no período entre as observações, i.e., supomos $\Delta\rho = 0$.

2.4.1.1 Caso bi-dimensional

A geometria da observação, no caso bi-dimensional, é apresentada na figura 2.8, onde A_1 e A_2 são os sensores, B é o comprimento da linha de base que separa as posições dos sensores, α é o ângulo que a linha de base B faz com a direção horizontal no sensor A_1 , θ é o ângulo que a linha de visada, que parte do sensor A_1 e vai até o alvo, faz com a vertical naquela posição, h é a altura do sensor A_1 em relação a uma superfície de referência e z é a altura do alvo em relação à mesma superfície de referência. Consideramos conhecidos A_1 e A_2 e a partir desses B e α . As observações são ρ_1 e ϕ .

Vamos determinar o ângulo θ de duas formas, em termos das observações e em termos das posições. Igualando essas duas formas obteremos a relação desejada.

Aplicando a lei dos cossenos no ângulo $(\alpha + (90^\circ - \theta))$ sobre A_1 , do triângulo A_2 – A_1 –alvo, obtemos:

$$\rho_2^2 = \rho_1^2 + B^2 - 2\rho_1 B \cos(\alpha + 90^\circ - \theta) \quad (2.13)$$

Podemos simplificar esta equação reescrevendo

$$\cos(\alpha + (90^\circ - \theta)) = \cos(-\alpha - 90^\circ + \theta) = \sin(\theta - \alpha),$$

expandindo $\rho_2^2 = (\rho_1 - \delta\rho)^2$, dividindo-a por ρ_1 e isolando $\delta\rho$. Obtemos com isso:

$$\delta\rho = \frac{(\delta\rho)^2}{\rho_1} - \frac{B^2}{2\rho_1} + B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.14)$$

Desprezando o termo de ordem $(\delta\rho)^2$ (ZEBKER et al., 1994, p. 618), obtemos:

$$\delta\rho \approx -\frac{B^2}{2\rho_1} + B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.15)$$

Podemos fazer uma segunda aproximação, chamada aproximação da onda plana (ZEBKER; GOLDSTEIN, 1986 apud ROSEN et al., 2000, p. 339), válida para geometrias orbitais, em que:

$$\delta\rho \approx B_{\parallel} \quad (2.16)$$

onde $B_{\parallel} \equiv B \sin(\theta - \alpha)$ é simplesmente a componente da linha de base B paralela à linha de visada. Por essa equação e pela (2.12), vemos que a diferença de fase ϕ é aproximadamente B_{\parallel} em número de comprimentos de onda, multiplicado por dois por causa do percurso de ida e volta. Aproveitamos para definir uma grandeza similar, que será útil mais adiante: a linha de base perpendicular B_{\perp} :

$$B_{\perp} \equiv B \cos(\theta - \alpha) \quad (2.17)$$

Substituindo a equação (2.16) na equação (2.12), nessa aproximação θ é dado em termos das observações (2.12) por:

$$\theta \approx \arcsin\left(-\frac{\phi\lambda}{4\pi B}\right) + \alpha \quad (2.18)$$

Pela figura 2.8, θ também pode ser determinado em termos da posição do alvo e do sensor:

$$\theta = \arccos\left(\frac{h-z}{\rho_1}\right) \quad (2.19)$$

Finalmente, igualando as duas últimas equações, a diferença de fase ϕ pode ser expressa em termos das posições do alvo e do sensor como:

$$\boxed{\phi = -4\pi \frac{B}{\lambda} \sin\left(\arccos\left(\frac{h-z}{\rho_1}\right) - \alpha\right)} \quad (2.20)$$

2.4.1.2 Caso tri-dimensional

No caso tri-dimensional vamos usar a notação de vetores, por ser mais concisa¹⁰. Usando um sistema de coordenadas centrado e fixo na Terra os resultados obtidos estarão georreferenciados.

A equação que relaciona o vetor posição \vec{T} do alvo, o vetor posição \vec{P} do sensor e o vetor \vec{l} de visada ou de alcance é

$$\vec{T} = \vec{P} + \vec{l} = \vec{P} + \rho \hat{l} \quad (2.21)$$

onde ρ é a distância do sensor ao alvo e \hat{l} é o vetor unitário na direção de \vec{l} . Supondo que \vec{P} é conhecido e ρ é observado, queremos expressar o vetor \hat{l} em termos da diferença de fase ϕ .

¹⁰Grandezas vetoriais vão ser denotadas assim: \vec{T} . O produto escalar é denotado por $\vec{T} \cdot \vec{T}$, e o produto vetorial por $\vec{T} \times \vec{T}$.

Seja \vec{B} o vetor linha de base do sensor 1 (A_1) para o sensor 2 (A_2) e B o seu comprimento, i.e.:

$$\vec{B} = \vec{P}_2 - \vec{P}_1 \quad (2.22)$$

$$B = |\vec{B}| \equiv (\vec{B} \cdot \vec{B})^{1/2}; \quad (2.23)$$

fazemos $\vec{P} = \vec{P}_1$; seja também

$$\vec{l}_i = \vec{T} - \vec{P}_i = \rho_i \hat{l}_i \quad (2.24)$$

$$|\vec{l}_i| = |\rho_i \hat{l}_i| = \rho_i \quad (2.25)$$

Podemos usar novamente a lei dos cossenos, dessa vez na forma vetorial, no ângulo sobre A_1 , obtendo:

$$\rho_2^2 = \rho_1^2 + B^2 - 2(\hat{l}_1 \cdot \vec{B}) \quad (2.26)$$

Realizando desenvolvimentos idênticos aos realizados no caso bi-dimensional, obtemos:

$$\delta\rho \approx (\hat{l}_i \cdot \vec{B}) \quad (2.27)$$

e

$$B_{\parallel} \equiv (\hat{l}_1 \cdot \vec{B}) \quad (2.28)$$

$$B_{\perp} \equiv (B^2 - B_{\parallel}^2)^{1/2} \quad (2.29)$$

e, finalmente,

$$\boxed{\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}(\hat{l}_1 \cdot \vec{B})} \quad (2.30)$$

onde

$$\hat{l}_1 = \frac{\vec{l}_1}{\rho_1} = \frac{\vec{T} - \vec{P}_1}{\rho_1}.$$

2.4.2 As equações de observação

A determinação da posição de um alvo é feita através da resolução do seguinte sistema de equações:

$$\rho_1 = |\vec{T} - \vec{P}_1| \quad \text{Esfera de Alcance} \quad (2.31)$$

$$f_{\text{Dop}} = \frac{2(\vec{v} \cdot \hat{l}_1)}{\lambda} \quad \text{Cone de Freqüência Doppler} \quad (2.32)$$

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}(\hat{l}_1 \cdot \vec{B}) \quad \text{Cone de Diferença de Fase} \quad (2.33)$$

onde f_{Dop} é a freqüência Doppler e \vec{v} é o vetor velocidade da plataforma. A primeira e segunda equações são fornecidas pelo SAR; a terceira é fornecida por InSAR. Nas subseções abaixo veremos como tais equações podem ser interpretadas geometricamente como superfícies, e a posição do alvo como o ponto de intersecção dessas três superfícies.

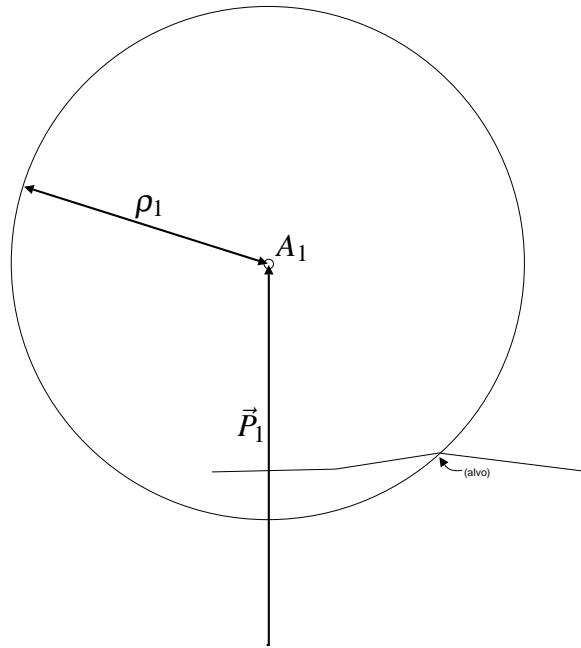


Figura 2.9: Esfera de alcance, em corte.

2.4.2.1 A equação da esfera de alcance

A equação

$$\rho_1 = |\vec{T} - \vec{P}_1| \quad (2.34)$$

pode ser interpretada geometricamente como a superfície de uma esfera, com raio igual a ρ_1 , centrada no sensor (\vec{P}_1), com mostrado, em corte, na figura 2.9.

Isso talvez seja mais fácil de interpretar expandindo os termos vetoriais nas suas componentes cartesianas,

$$\begin{aligned} \vec{T}_1 &= (T_x, T_y, T_z) \\ \vec{P}_1 &= (P_x, P_y, P_z), \end{aligned}$$

obtendo com isso a expressão canônica da superfície de uma esfera:

$$\rho_1^2 = (T_x - P_x)^2 + (T_y - P_y)^2 + (T_z - P_z)^2.$$

2.4.2.2 A equação do cone de deslocamento de frequência Doppler

A equação

$$f_{\text{Dop}} = \frac{2(\vec{v} \cdot \hat{l}_1)}{\lambda}$$

pode ser interpretada geometricamente como a superfície de um cone (infinito), com eixo de revolução coincidente com o vetor velocidade \vec{v} da plataforma, ponta na posição do sensor \vec{P}_1 e semi-ângulo de abertura igual ao ângulo entre o vetor velocidade \vec{v} e o vetor de alcance \hat{l}_1 , chamado ângulo Doppler (α_{Dop}). Se esse cone fosse representado sobre a figura 2.9, o eixo estaria sobre A_1 , perpendicular à página. Normalmente o ângulo Doppler é igual a 90° , fazendo o cone degenerar em um plano (no caso da figura 2.9, o plano da página).

$$\frac{f_{\text{Dop}} \lambda}{2} = v \cos(\alpha_{\text{Dop}})$$

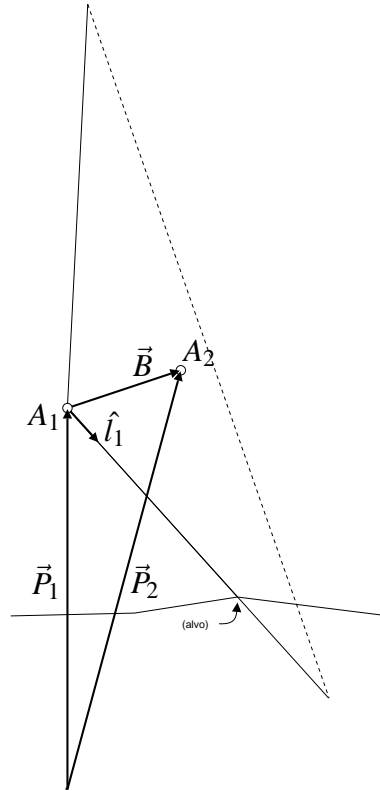


Figura 2.10: Cone de diferença de fase, em corte.

2.4.2.3 A equação do cone de diferença de fase

A equação

$$\phi = -\frac{4\phi}{\lambda} (\hat{l}_1 \cdot \vec{B})$$

também pode ser interpretada geometricamente como a superfície de um cone (infinito), com eixo de revolução coincidente com o vetor linha de base \vec{B} , ponta na posição do sensor \vec{P}_1 e semi-ângulo de abertura igual ao ângulo entre o vetor linha de base \vec{B} e o vetor de alcance \hat{l}_1 .

$$-\frac{\phi\lambda}{4\pi} = \frac{(T_x - P_x)B_x + (T_y - P_y)B_y + (T_z - P_z)B_z}{\rho_1}$$

2.4.3 Cálculo da posição do alvo

A posição do alvo é dada geometricamente pela intersecção das superfícies representadas por cada uma das três equações, da esfera de alcance, do cone de frequência Doppler e do cone de diferença de fase. Isso pode ser visto na figura 2.11. Tal solução é encontrada analiticamente resolvendo o sistema de equações (2.31), (2.32), (2.33). Tal sistema parece não-linear (note as potências nas versões expandidas das equações acima), mas escolhendo uma base adequada, com origem em \vec{P}_1 , o sistema torna-se linear e pode ser solucionado diretamente (ROSEN et al., 2000, p. 341).

Os valores de ρ_1 e f_{Dop} podem ser obtidos por transformação das coordenadas linha e coluna das imagens SAR. Os valores de \vec{P}_1 e \vec{P}_2 para plataformas orbitais normalmente são obtidos pelas efemérides (preditas ou pós-processadas) das plataformas, algumas vezes refinadas com pontos de controle.

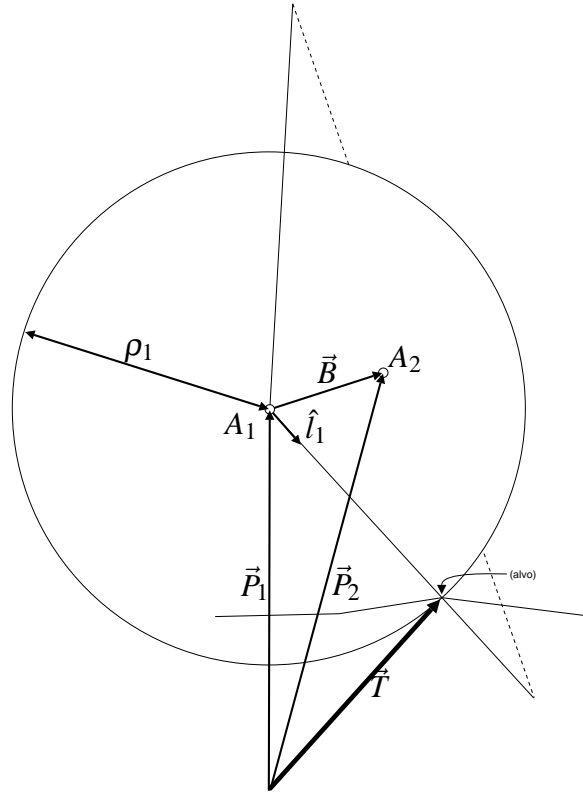


Figura 2.11: Intersecção das superfícies dadas pelas equações de observação, em corte.

2.5 Determinação do deslocamento de alvos

Na determinação do deslocamento de alvos, as observações são realizadas em instantes $t_2 > t_1$ diferentes. O deslocamento determinado corresponde ao ocorrido no período t_1-t_2 , e pode ser de qualquer tipo – contínuo ou instantâneo, constante ou variável. O arranjo dos dispersores que constituem o elemento de resolução no solo deve ser preservado, de forma que a componente da fase devido ao retro-espalhamento, φ^E , não mude significativamente entre as observações.

2.5.1 Relação da diferença de fase com o deslocamento do alvo

Suponha que duas observações foram feitas em posições e instantes diferentes, (\vec{P}_1, t_1) e $(\vec{P}_2, t_2 > t_1)$, e que ocorreu um deslocamento do alvo entre t_1 e t_2 (veja a figura 2.12). Neste caso, o vetor de alcance \vec{l}_2 ao alvo na segunda observação se torna

$$\begin{aligned}\vec{l}_2 &= \vec{T} + \vec{D} - \vec{P}_2 \\ &= \vec{P}_1 + \vec{l}_1 + \vec{D} - \vec{P}_2 \\ &= \vec{l}_1 + \vec{D} - \vec{B}\end{aligned}\tag{2.35}$$

onde \vec{D} é o vetor deslocamento do alvo. A diferença na distância percorrida pelos sinais é

$$\rho_2 - \rho_1 = |\vec{l}_1 + \vec{D} - \vec{B}| - \rho_1.\tag{2.36}$$

Podemos simplificar a expressão (2.36) acima através da seqüência de passos abaixo. O leitor não interessado nesse desenvolvimento pode pular diretamente para o resultado, equação (2.41).

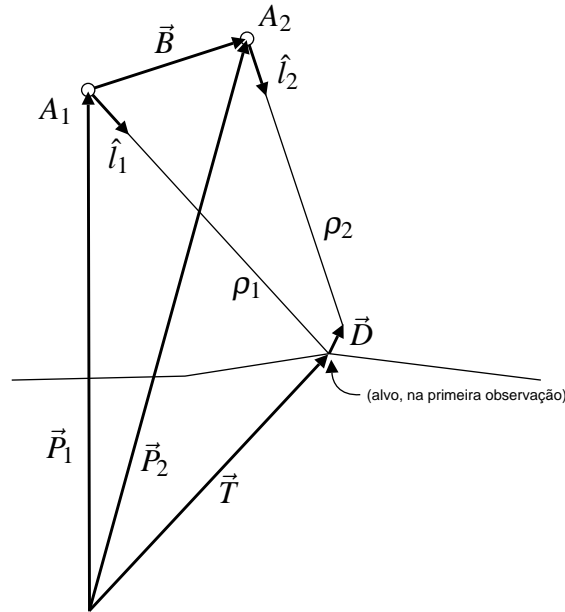


Figura 2.12: Geometria do deslocamento de alvos.

1. Multiplicamos (2.36) por $\rho_1/\rho_1 = 1$, o que obviamente não altera o valor da expressão mas nos permite reescrevê-la como:

$$\begin{aligned} \rho_2 - \rho_1 &= \left\{ |\vec{l}_1 + \vec{D} - \vec{B}| - \rho_1 \right\} \frac{\rho_1}{\rho_1} \\ &= \left\{ |\hat{l}_1 + \rho_1^{-1}(\vec{D} - \vec{B})| - 1 \right\} \rho_1 \end{aligned} \quad (2.37)$$

2. Expandimos o comprimento do vetor, fazendo $|\vec{X}| = [\vec{X} \cdot \vec{X}]^{1/2}$:

$$\rho_2 - \rho_1 = \left\{ \left[\hat{l}_1 \cdot \hat{l}_1 + 2\rho_1^{-1}\hat{l}_1 \cdot (\vec{D} - \vec{B}) + \rho_1^{-2}(\vec{D} - \vec{B}) \cdot (\vec{D} - \vec{B}) \right]^{1/2} - 1 \right\} \rho_1 \quad (2.38)$$

3. Nota-se que $\hat{l}_1 \cdot \hat{l}_1 = 1$, por definição do vetor unitário. O terceiro termo entre colchetes se expande em $(B/\rho_1)^2 + (D/\rho_1)^2 - 2(\vec{B} \cdot \vec{D})/\rho_1^2$. Como B e D são muito menores que ρ_1 (usualmente, em geometrias orbitais, $B < 1$ km, D é da ordem de metros e $\rho_1 \approx 600 - 800$ km (ROSEN et al., 2000, p. 344)), todo esse terceiro termo pode ser desprezado, restando

$$\rho_2 - \rho_1 \approx \left\{ \left[1 + 2\rho_1^{-1}\hat{l}_1 \cdot (\vec{D} - \vec{B}) \right]^{1/2} - 1 \right\} \rho_1 \quad (2.39)$$

4. Agora usamos a série binomial, $(1+x)^n = 1 + nx/1! + n(n-1)x^2/2! + \dots$, $(x^2) < 1$, onde $n = 1/2$ e $x = 2\rho_1^{-1}\hat{l}_1 \cdot (\vec{D} - \vec{B})$, truncada no segundo termo, para reescrevermos

$$\rho_2 - \rho_1 \approx \left\{ \left[1 + (1/2)2\rho_1^{-1}\hat{l}_1 \cdot (\vec{D} - \vec{B}) \right] - 1 \right\} \rho_1 \quad (2.40)$$

5. Simplificando essa expressão, obtemos finalmente

$$\rho_2 - \rho_1 \approx -\hat{l}_1 \cdot \vec{B} + \hat{l}_1 \cdot \vec{D} \quad (2.41)$$

Com esse resultado (2.41), podemos escrever a diferença de fase como

$$\boxed{\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(-\hat{l}_1 \cdot \vec{B} + \hat{l}_1 \cdot \vec{D} \right)} \quad (2.42)$$

que corresponde à fórmula (2.12), apresentada sem prova na seção 2.3.2 e repetida abaixo,

$$\phi = -4\pi \frac{(\delta\rho + \Delta\rho)}{\lambda}, \quad (2.43)$$

onde $\delta\rho = \hat{l}_1 \cdot \vec{B}$ e $\Delta\rho = -\hat{l}_1 \cdot \vec{D}$. Também está de acordo com a fórmula (2.30), repetida abaixo, em que supomos $\Delta\rho = 0$:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} (\hat{l}_1 \cdot \vec{B}). \quad (2.44)$$

Por último, apresentamos uma forma da equação (2.42) que será útil na próxima seção:

$$\phi = \phi_{\text{elevação}} + \phi_{\text{deslocamento}}. \quad (2.45)$$

2.5.2 Cálculo do deslocamento do alvo

Para determinarmos o deslocamento do alvo a partir da diferença de fase medida, precisamos primeiro remover a componente da diferença de fase devida à posição do alvo, $\phi_{\text{elevação}}$. Para fazermos isso, supomos que uma segunda observação, ϕ' , contém componente devido ao deslocamento nulo (i.e., $\phi_{\text{deslocamento}} = 0$). Assim usamos $\phi' = \phi_{\text{elevação}}$ para obter

$$\phi - \phi' = \phi_{\text{deslocamento}}. \quad (2.46)$$

O conjunto de valores de ϕ' constitui um interferograma. Há basicamente dois métodos para estimar esse interferograma suplementar: o método de duas passadas e o método de três ou quatro passadas. Ambos são apresentados na seção 2.6.2.

Uma vez isolado $\phi_{\text{deslocamento}}$, podemos invertê-lo para obter $\Delta\rho$:

$$\Delta\rho = -\frac{\phi_{\text{deslocamento}}\lambda}{4\pi}. \quad (2.47)$$

É importante salientar que $\Delta\rho$ é apenas a componente do deslocamento completo \vec{D} na contra-direção de alcance $-\hat{l}_1$ do radar. Para obtermos o vetor \vec{D} completo é preciso observações adicionais a partir de ângulos de aspecto (Norte, Sul, Leste, Oeste, etc.) diferentes, combinando, p.ex., um interferograma gerado com imagens tomadas em uma órbita descendente com um interferograma de imagens de uma órbita ascendente.

Na falta de observações adicionais, podemos obter a magnitude D do deslocamento completo \vec{D} fazendo suposições sobre a sua direção \hat{D} , com base em conhecimento sobre a natureza do fenômeno monitorado. P.ex., em casos de subsidência do solo em áreas de mineração subterrânea ou em casos de deslizamento de terra ou escoamento de gelo é plausível supor que a direção principal do deslocamento seja, respectivamente, vertical e tangente à superfície (HELLWICH, 1999, p. 6–7).

Assim, podemos fazer

$$D = \frac{\Delta\rho}{-\hat{l}_1 \cdot \hat{D}} \quad (2.48)$$

onde D e \hat{D} são, respectivamente, a magnitude estimada e a direção suposta do deslocamento completo \vec{D} . P.ex., especializando no caso dimensional (figura 2.13),

$$-\hat{l}_1 = -(\sin \theta, -\cos \theta)$$

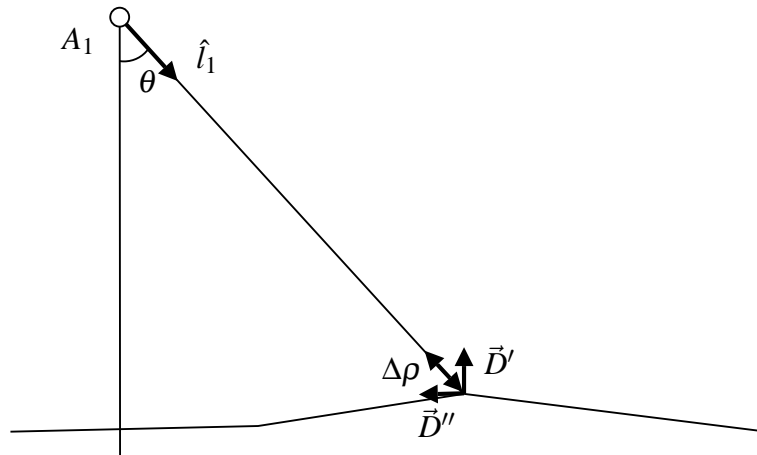


Figura 2.13: Estimativa da magnitude do deslocamento completo a partir da sua direção suposta.

Supondo que a direção do deslocamento completo seja apenas horizontal (i.e., $\hat{D}'' = (+1, 0)$), estimamos a magnitude

$$D'' = -\frac{\Delta\rho}{\sin\theta};$$

supondo que a direção do deslocamento completo seja apenas vertical (i.e., $\hat{D}' = (0, +1)$), estimamos

$$D' = \frac{\Delta\rho}{\cos\theta}.$$

O sinal de D estimado indica o sentido correto do deslocamento: se positivo, é na direção e sentido supostos em \hat{D} ; se negativo, é no sentido contrário do suposto (i.e., $-\hat{D}$).

2.6 Processamento InSAR

O processamento InSAR é o processo ou seqüência de passos realizado para aplicar em massa os métodos de determinação da posição ou deslocamento de alvos apresentados nas seções anteriores. Aqueles métodos têm de ser aplicados a cada pixel da área de sobreposição das imagens que formam o par interferométrico, contendo facilmente milhões de pixels (e conseqüentemente, milhões de medidas de elevação ou de deformação).

O processo é resumido graficamente através de um fluxograma (figura 2.14). Tal fluxograma foi elaborado a partir de diversos outros fluxogramas ou diagramas de bloco a respeito do processamento InSAR propostos por outros autores na literatura. Além disso, ele foi elaborado seguindo uma notação gráfica que visa a apoiar o desenvolvimento de software, chamada UML (*Unified Modeling Language*)¹¹.

O processo de geração de mapas de deformação inclui e estende o processo de geração de mapas de elevação. Por isso este será apresentado primeiro¹².

2.6.1 Processamento InSAR para geração de mapas de elevação

O processamento interferométrico de imagens de radar de abertura sintética começa com duas imagens com nível de processamento SLC (*Single-Look Complex*) e suas res-

¹¹Mais especificamente, a parte de diagramas de atividade da UML.

¹²A apresentação abaixo é baseada em Bürgmann, Rosen e Fielding (2000, p.175–179), Massonnet e Feigl (1998, p. 454–460), Hellwich (1999, p. 2–4), Ager (2001, p. 339) e Rocca, Prati e Ferretti (1997).

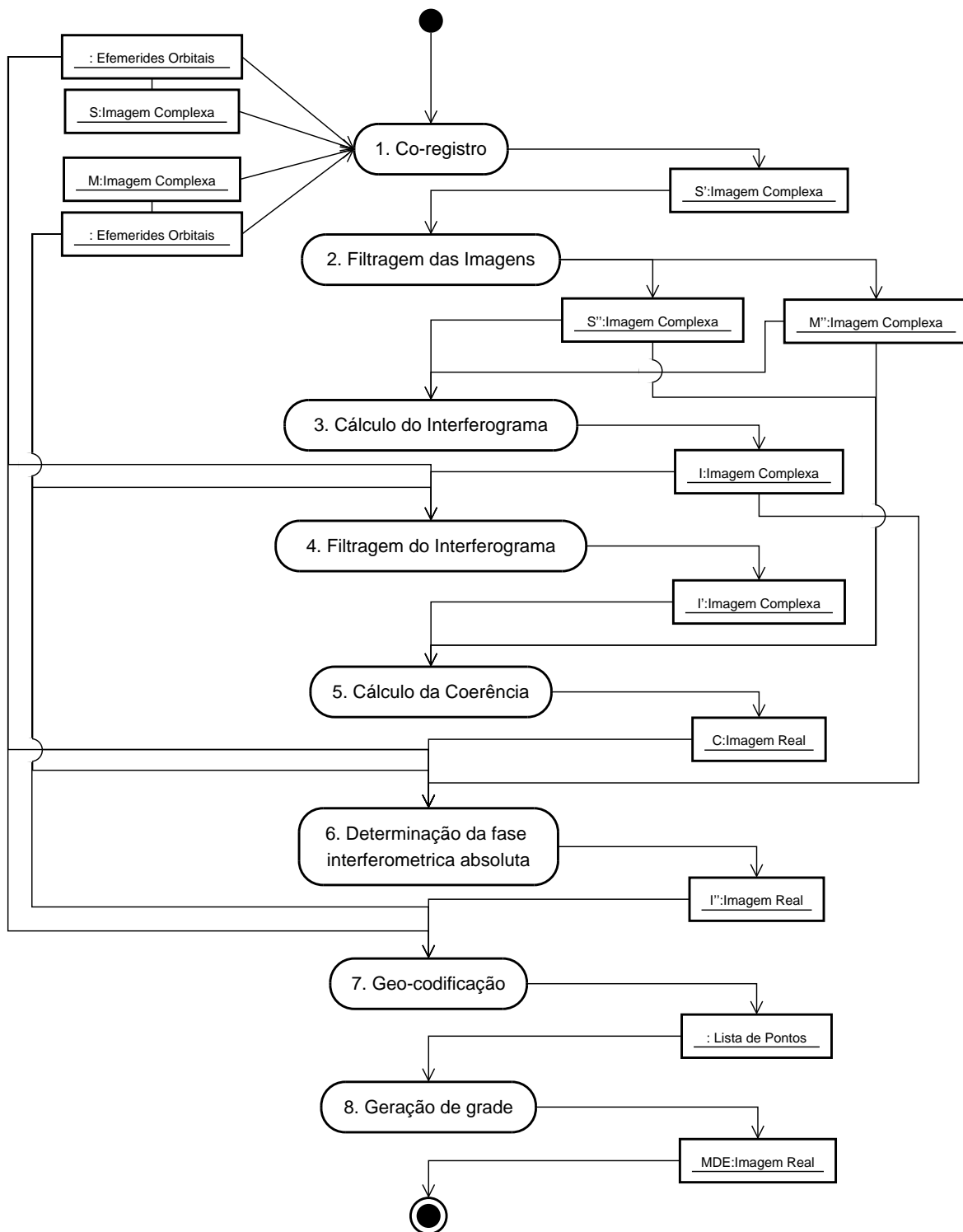


Figura 2.14: Fluxograma do processamento InSAR para geração de mapas de elevação.

pectivas efemérides orbitais. Tais imagens contêm o sinal complexo, com parte real e imaginária. As linhas estão na direção de alcance direto do radar, enquanto que as colunas estão na direção de azimute. As efemérides orbitais normalmente são uma lista de instantes e respectivas posições da plataforma que carrega o radar; a velocidade é determinada ajustando uma função aos pontos e derivando tal função em relação ao tempo. Chamaremos uma das imagens de *principal* e a outra de *secundária* e as denotaremos por M e S , respectivamente¹³.

O primeiro passo no processo é o *co-registro* das imagens, i.e., deseja-se transformar a imagem secundária para que pixels na mesma posição (i.e., mesma linha e coluna) nas duas imagens descrevam o mesmo elemento de resolução no solo. Este passo, por sua vez, é dividido em duas: primeiro a transformação é calculada e depois ela é aplicada. O cálculo da transformação é feito normalmente através da correlação cruzada da amplitude do sinal em pedaços das duas imagens, o que funciona muito bem (i.e., até centésimos de pixel) porque a iluminação das cenas é idêntica. A aplicação da transformação é feita transformando as coordenadas da posição dos pixels da imagem principal para a imagem secundária e *interpolando* o valor complexo do sinal na imagem secundária. O interpolador aplicado deve preservar a fase do sinal. O resultado deste passo é uma imagem secundária, que denotaremos por S' , registrada e com a mesma geometria (i.e., mesmo número e comprimento de linhas e colunas) da principal.

O segundo passo, opcional, é a *filtragem das imagens*, individualmente. Isto é realizado para melhorar a relação sinal-ruído de cada imagem.

O terceiro passo é o *cálculo do interferograma*. Apesar de produzir o principal resultado do processamento InSAR, é um passo extremamente simples. Trata-se do produto complexo conjugado das duas imagens, pixel a pixel:

$$I = MS'^* \quad (2.49)$$

onde S'^* é o conjugado complexo de S' e I é o *interferograma complexo* resultante, cuja fase constitui o interferograma (como definido na seção 2.3.4). É imprescindível que as imagens estejam co-registradas, porque senão a componente da fase devido ao retroespalhamento no solo, ϕ^E , não se cancelará durante o cálculo do interferograma.

O quarto passo é a *filtragem do interferograma* complexo. Isto é feito para eliminar ruídos e também para remover as componentes de maior frequência, facilitando o passo posterior de desenrolamento de fase. Uma filtragem normalmente empregada é a remoção da componente da diferença de fase devida a um modelo elipsóidico ou esférico da Terra. Isto é feito calculando sinteticamente a diferença de fase esperada se a Terra fosse lisa ou não tivesse topografia e subtraindo-a da diferença de fase medida. A franjas que restam são devidas apenas à topografia (ignorando deslocamentos ou outras fontes de variação na distância percorrida pelo sinal), e assim se assemelham bastante às curvas de nível de um mapa topográfico. Esta componente removida deve ser restaurada durante a determinação da diferença de fase absoluta.

O quinto passo é o *cálculo da coerência* γ , igual à magnitude da coerência complexa γ_c ($\gamma = |\gamma_c|$). Teoricamente γ_c é dada pela expressão

$$\gamma = \frac{E[s_1 s_2^*]}{\sqrt{E[|s_1|^2] E[|s_2|^2]}}, \quad (2.50)$$

¹³A notação adotada segue a utilizada por autores internacionalmente, onde as imagens são chamadas *master* (M) e *slave* (S).

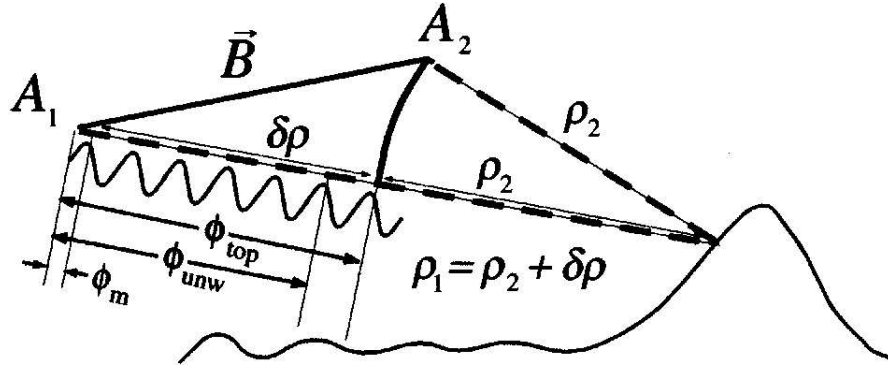


Figura 2.15: Diferentes tipos de fase interferométrica: principal ($\phi_p = \phi_m$), desenrolado ($\phi_{des} = \phi_{unw}$), completa ($\phi = \phi_{top}$). Copiado de Rosen et al. (2000, p. 339).

avaliada pixel a pixel, onde s_1 e s_2 são os sinais complexos do mesmo pixel nas imagens principal e secundária, respectivamente, $|s_1|$ e $|s_2|$ são suas amplitudes, e $E[\cdot]$ representa a esperança matemática do sinal. Na prática $E[\cdot]$ é estimado para um pixel como a média do valor dos pixels vizinhos contidos em uma janela centralizada no pixel avaliado. A estimativa $\hat{\gamma}$ de γ fica, então:

$$\hat{\gamma}_c = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_1(n) s_2^*(n)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s_1(n)|^2 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s_2(n)|^2}}, \quad (2.51)$$

o que pode ser simplificado como

$$\hat{\gamma}_c = \frac{\sum_{n=1}^N s_1(n) s_2^*(n)}{\sum_{n=1}^N |s_1(n)| \sum_{n=1}^N |s_2(n)|}, \quad (2.52)$$

onde $s_1(n)$ e $s_2(n)$ são o valor do n -ésimo pixel vizinho ao pixel avaliado nas imagens principal e secundária, respectivamente, e N é o número de pixels na janela. É importante salientar que o valor estimado da coerência depende do tamanho da janela adotada na estimativa da esperança matemática. A coerência é equivalente à relação sinal-ruído (SNR), através da seguinte expressão

$$\text{SNR} = \frac{\gamma}{1 - \gamma}; \quad (2.53)$$

portanto a coerência pode ser usada para determinar onde foram obtidos valores de diferença de fase confiáveis.

O sexto passo é a *determinação da diferença fase absoluta*. Como dito na seção 2.3.3.1, apenas o valor principal ϕ_p ($0 \leq \phi_p < 2\pi$) da diferença de fase completa ϕ é medido pelo radar. Para determinar ϕ a partir de ϕ_p são necessárias duas operações subsequentes: desenrolamento de fase e resolução da ambigüidade inteira. Na primeira operação a fase de um pixel do interferograma é conectada com a fase dos pixels vizinhos, adicionando a ele um número k_{des} inteiro de ciclos, *variável* especialmente na imagem:

$$\phi_{des} = \phi_p + 2\pi k_{des} \quad (2.54)$$

Um perfil de um interferograma desenrolado é apresentado na figura 2.16. Na segunda operação é determinado um número k_{abs} inteiro, *uniforme* para a imagem inteira, fazendo

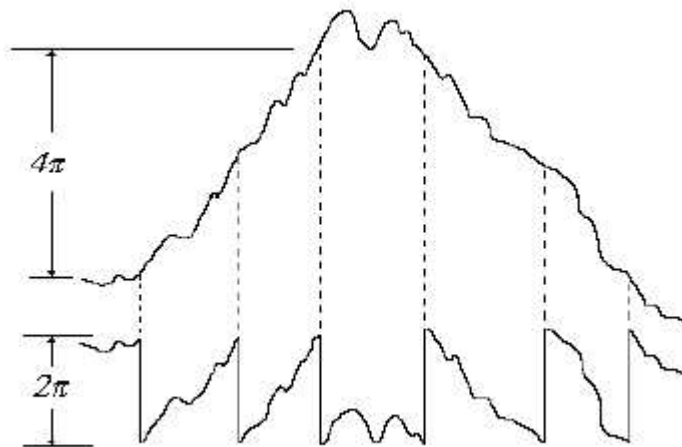


Figura 2.16: Perfil de um interferograma e de seu correspondente des enrolado. Copiado de Mura (2003, p. 9).

a diferença de fase proporcional à diferença na distância percorrida pelos sinais (que pode ser igual a muitos múltiplos de 2π):

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_{\text{des}} + k_{\text{abs}} \\ &= \phi_p + 2\pi k_{\text{des}} + 2\pi k_{\text{abs}}\end{aligned}\quad (2.55)$$

Se no quarto passo foi removida alguma componente da diferença de fase para, p.ex., facilitar o desenrolamento da fase, ela deve ser restaurada antes de resolver a ambigüidade inteira.

O sétimo passo é a *geo-codificação* dos pixels, i.e., aplicamos os valores medidos de ϕ , ρ_1 e f_{Dop} de cada pixel e os valores de \vec{P}_1 , \vec{v} e \vec{B} , obtidos das efemérides orbitais da plataforma, nas equações de observação (seção 2.4.2), determinando assim a posição geodésica dos pixels em um sistema de referência centrado e fixo na Terra. O produto é uma massa de pontos *irregularmente* espaçados.

O oitavo passo é opcional, mas bastante comum. É a *geração de uma grade regular de elevação* (um Modelo Digital de Elevação). Isto é feito aplicando um projeção cartográfica a todos os pontos determinados no passo anterior e depois interpolando regularmente o valor de elevação a partir dessa massa de pontos.

2.6.2 Processamento InSAR para geração de mapas de deformação

No processamento InSAR para geração de mapas de deformação, além de todos os passos do processo anterior, temos que remover a componente da diferença de fase devida à topografia, restando apenas a componente devida ao deslocamento, conforme explicado na seção 2.5. Isto pode ser feito por dois métodos: o método de duas passadas e o método de três ou quatro passadas.

O método de duas passadas tem esse nome porque o radar passa apenas duas vezes observando o alvo. Numa passada ele adquire a imagem principal M e na outra passada ele adquire a imagem secundária S . O deslocamento determinado com esse par de imagens aconteceu no período entre as duas passadas. A componente topográfica da diferença de fase, $\phi_{\text{elevação}}$, é estimada utilizando um Modelo Digital de Elevação (MDE)

externo, obtido por qualquer técnica, incluindo técnicas diferentes de InSAR (como p.ex., fotogrametria). O MDE é utilizado para calcular ou sintetizar a diferença de fase devida à topografia representada pelo MDE (sem deslocamento), que seria observada a partir da mesma geometria do par original.

O método de três ou quatro passadas tem esse nome porque, além das duas passadas do método anterior, inclui outras. Forma-se um par interferométrico suplementar utilizando uma terceira imagem e uma das imagens do par original ou uma quarta imagem. O importante é que o par suplementar seja adquirido durante um período em que supostamente *não* houve deslocamento do alvo. P.ex., se o deslocamento foi devido a um terremoto, duas imagens anteriores ou posteriores ao terremoto são normalmente suficientes. Este par suplementar é processado conforme o processo para geração de mapas de elevação, apenas até o desenrolamento da fase (inclusive). Então a diferença de fase ϕ desse par suplementar é usada através da seguinte expressão:

$$\phi_{\text{deslocamento}} = \phi' - \frac{B'_{\perp}}{B_{\perp}} \phi \quad (2.56)$$

onde ϕ' é a diferença de fase do par principal.

A diferença de fase calculada por qualquer um dos dois métodos acima é chamada normalmente fase interferométrica diferencial, e o interferograma correspondente é chamado interferograma diferencial.

2.7 Limitações

O objetivo dessa seção é dar uma noção dos limites de aplicação de InSAR. Nesse sentido, apenas os limites mais severos são ressaltados.

2.7.1 Sensibilidade

É interessante notar que InSAR é muito mais sensível a deslocamentos do que a elevações. Podemos ver isso através da fórmula

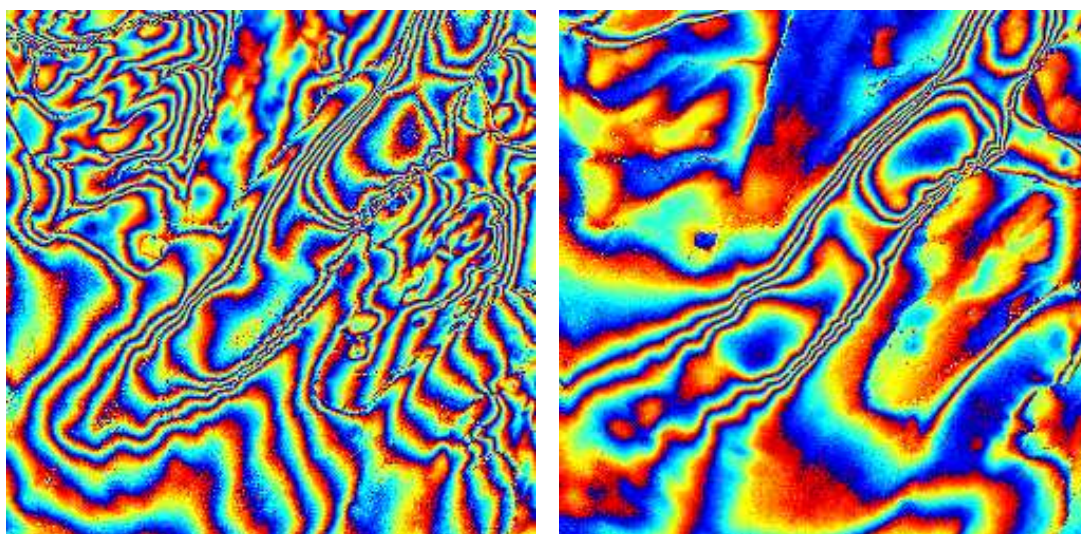
$$\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} (-\vec{B} \cdot \hat{l}_1 + \vec{D} \cdot \hat{l}_1); \quad (2.57)$$

um deslocamento de $\lambda/2$ na direção da linha de visada do radar produz uma variação de 2π na fase ou uma franja no interferograma. No caso do sensor ERS, que opera na banda C ($\lambda = 5,6$ cm), esse deslocamento é de apenas 28 mm. Para obter a variação em elevação que causa uma variação de 2π em fase, definimos a altura de ambigüidade h_a

$$h_a \equiv 2\pi \frac{\partial h}{\partial \phi} = \frac{\lambda \rho_1 \sin \theta}{2B_{\perp}} \quad (2.58)$$

Assim, no caso do ERS, com uma linha de base $B = 100$ m, é preciso uma variação de cem metros em elevação ($h_a = 100$ m) para obter uma franja no interferograma.

Vemos também que a altura de ambigüidade h_a é inversamente proporcional à componente perpendicular B_{\perp} da linha de base. Dito de outra forma, a sensibilidade à topografia é tanto maior quanto maior é B_{\perp} . Um exemplo é dado na figura 2.17. Assim, quando queremos mapear elevações, buscamos um par com B_{\perp} grande (mas menor que a linha de base crítica, conforme explicado abaixo, em decorrelação geométrica). Por outro lado, quando queremos mapear deformações, buscamos um par com o menor B_{\perp} – em princípio, se $B_{\perp} = 0$, não há componente topográfica a ser removida da diferença de fase.



(a) Interferograma com linha de base perpendicular $B_{\perp} = 45\text{ m}$ (b) Interferograma com linha de base perpendicular $B_{\perp} = 162\text{ m}$

Figura 2.17: Dois interferogramas da mesma região com comprimentos de linha de base perpendicular diferentes.

2.7.2 Fontes de erros

Se a fase ϕ medida pelo radar for eivada de erros ou ruídos, isso pode fazer com que a diferença de fase ϕ , calculada durante a formação do interferograma, não contenha apenas a componente devida à diferença no percurso dos sinais, que é a medida que nos interessa para a determinação da posição e deslocamento de alvos. O ruído na diferença de fase pode ser medido através da coerência, calculada conforme seção 2.6. As fontes de ruído mais comum na fase são, em ordem de severidade:

decorrelação temporal: a componente ϕ^E da fase, devida ao espalhamento do sinal no elemento de resolução da superfície imageada, pode ser modelada como a soma coerente do retro-espalhamento proveniente de cada dispensor que compõem o elemento de resolução, até um plano perpendicular à linha de visada do radar (veja a figura 2.19). Qualquer mudança temporal dentro de um elemento de resolução, como crescimento ou mesmo movimento da vegetação, erosão, colheita, etc. pode alterar a componente ϕ^E da fase. As mudanças detectadas pelo radar dependem fortemente do comprimento de onda da radiação empregada no imageamento: comprimentos de onda pequenos, como o da banda X e da banda C, são mais sensíveis do que os comprimentos de onda da banda L. Na prática, observações de áreas com vegetação densa não produzem interferogramas coerentes, mesmo com apenas um dia de separação. Em áreas áridas, como desertos, e em áreas urbanas, a coerência pode ser mantida por vários anos.

efeitos atmosféricos: a atmosfera tem índice de refração variável espacialmente e temporalmente. Tal variação introduz variações significativas na fase, dando origem a variações de, respectivamente, decímetros e centenas de metros nos deslocamentos e elevações determinados. A figura 2.18 apresenta sobrepostos sete perfis de Modelos Digitais de Elevação da mesma região, gerados por InSAR. Nota-se claramente a variabilidade em relação a um perfil médio, mais severamente em dois dos sete perfis, que o autor (ROCCA; PRATI; FERRETTI, 1997) atribui a efeitos atmosféricos.

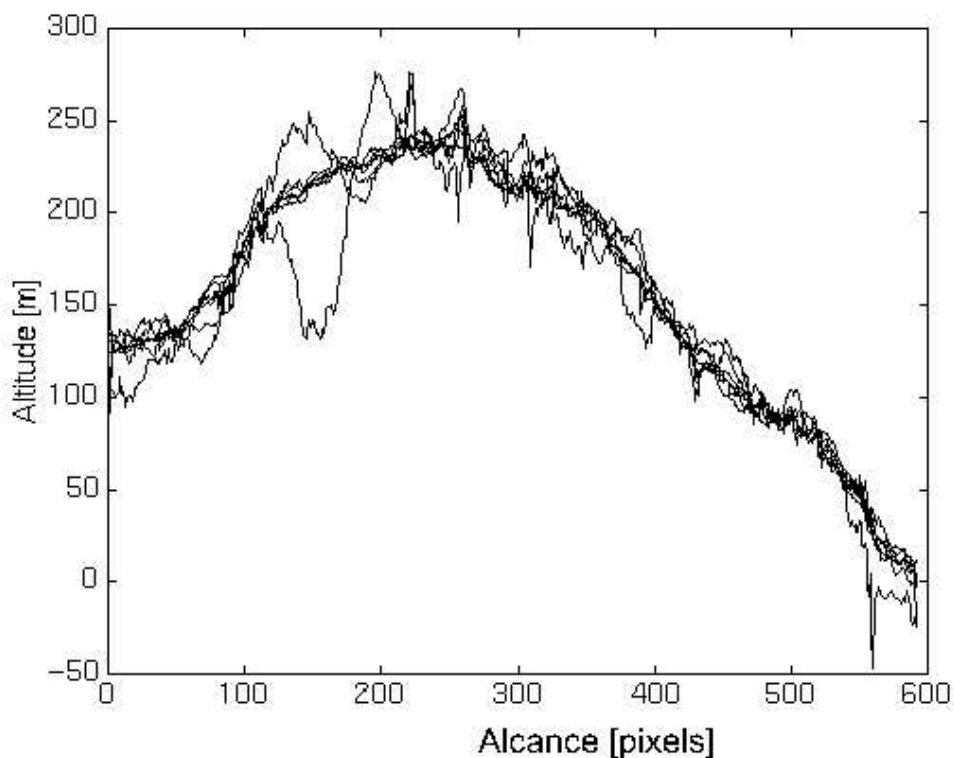


Figura 2.18: Variação nos perfis de MDEs da mesma região, devido a efeitos atmosféricos. Adaptado de Rocca, Prati e Ferretti (1997).

decorrelação geométrica ou devida à linha de base: se o mesmo elemento de resolução é observado a partir de ângulos diferentes, o retorno coerente dos dispersores que compõem o elemento vão se somar de forma diferente, produzindo um retroespalhamento diferente. Até um certo ângulo, isto é tolerável (veja a figura 2.19), porém ângulos maiores ou, de forma equivalente, linhas de base perpendiculares maiores, causam a decorrelação do sinal. Por esse motivo, imagens SAR de órbitas diferentes (p.ex., ascendente e descendente) não podem ser combinadas para formar um interferograma. O comprimento da maior linha de base perpendicular, acima da qual há completa decorrelação geométrica do sinal, é chamada *linha de base crítica*.

O vetor linha de base \vec{B} e as distâncias ρ_1 e ρ_2 tem de ser conhecidos com extrema precisão e acurácia, normalmente da ordem de milímetros. Em sensores orbitais, o conhecimento das órbitas ainda não é preciso o suficiente, o que normalmente exige o uso de pontos de controle para refinamento do modelo da linha de base e também para resolver a ambigüidade inteira na determinação da fase absoluta.

Uma limitação inerente ao radar imageador são as sombras: dependendo do ângulo de elevação e da topografia, algumas partes de uma região montanhosa podem não serem visíveis pelo radar. Nessas regiões não haverá medidas de elevação nem de deslocamento dos alvos.

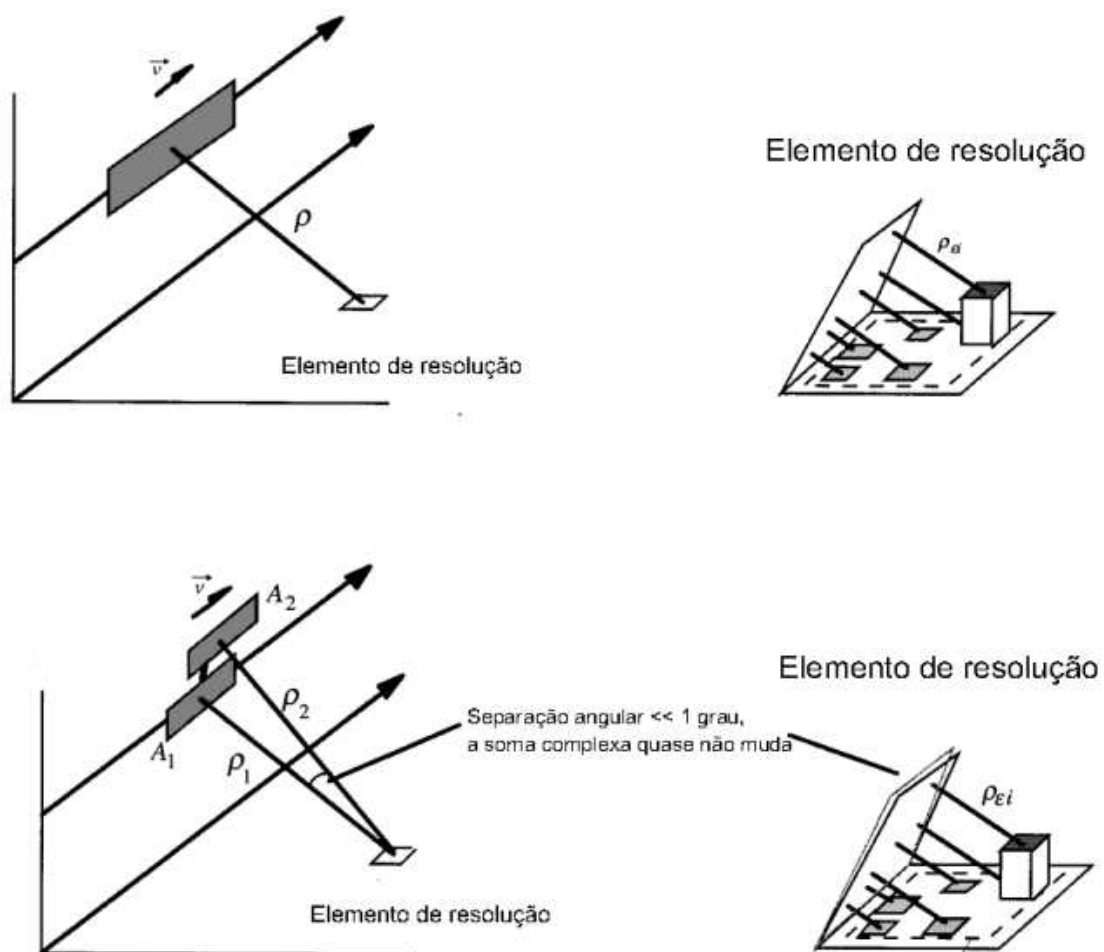


Figura 2.19: Variação na soma complexa do retorno dos alvos que compõem um elemento de resolução com a variação no ângulo de incidência. Adaptado de Rosen et al. (2000, p. 338).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais usados são basicamente dados (imagens SAR e as correspondentes efemérides orbitais) em formato digital. Os métodos foram aplicados através de programas de computador. Ambos são detalhados nas sub-seções abaixo.

3.1 Dados

Foram obtidos três conjuntos de dados (imagens), todos com nível de processamento SLC (*Single-Look Complex*), que mantém a informação de fase do sinal, imprescindível para o processamento interferométrico. Em imagens com esse nível de processamento, as linhas e as colunas são alinhadas com as direções de alcance direto e de azimute, respectivamente.

3.1.1 Dados ERS

Um par de imagens de teste é disponibilizado juntamente com o programa DORIS (descrito abaixo), para os usuários se familiarizarem com o programa. São dados coletados pelos satélites ERS-1 e ERS-2, durante a chamada missão *tandem*, período em que as órbitas dos satélites foram ajustadas de forma que o ERS-2 repetisse a órbita do ERS-1 um dia depois. As imagens dos dois satélites são compatíveis entre si para processamento interferométrico. Os parâmetros em comum das duas imagens são apresentados na tabela 3.1, e os parâmetros específicos das imagens principal e secundária são apresentados, respectivamente, nas tabelas 3.2 e 3.3. A figura 3.1 apresenta a área de extensão das cenas (entretanto, foi utilizado apenas um recorte das cenas). A amplitude e a fase das imagens principal e secundária são mostradas nas figuras 3.2 e 3.3.

3.1.2 Dados SIR-C

Um par de imagens coletadas na missão SIR-C sobre a região do Mt. Etna, na Itália, foram oferecidas e cedidas pelo Prof. Dr. José Cláudio Mura¹, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais cuja tese de doutorado (MURA, 2000) versa sobre InSAR.

¹Email <mura@dpi.inpe.br>

Ângulo de incidência (no centro da cena)	23,22°
Frequência da radiação	5,3 GHz
Comprimento de onda da radiação	5,66660 cm

Tabela 3.1: Dados ERS – parâmetros em comum para as duas imagens.

Sensor	ERS-2
Órbita	1393
Data de aquisição	27/jul/1995
Quadro	2781
Latitude do centro da cena	40,9480°N
Longitude do centro da cena	14,0270°E
Orientação no centro da cena	192,7668°
Número de linhas	26555
Número de colunas	4900
Linhas do recorte utilizado	1–800
Colunas do recorte utilizado	1–300

Tabela 3.2: Dados ERS – parâmetros da imagem principal.

Sensor	ERS-1
Órbita	21066
Data de aquisição	26/jul/1995
Quadro	2781
Latitude do centro da cena	40,9400°N
Longitude do centro da cena	14,0240°E
Orientação no centro da cena	192,7684°
Número de linhas	26518
Número de colunas	4900
Linhas do recorte utilizado	1–800
Colunas do recorte utilizado	1–300

Tabela 3.3: Dados ERS – parâmetros da imagem secundária.

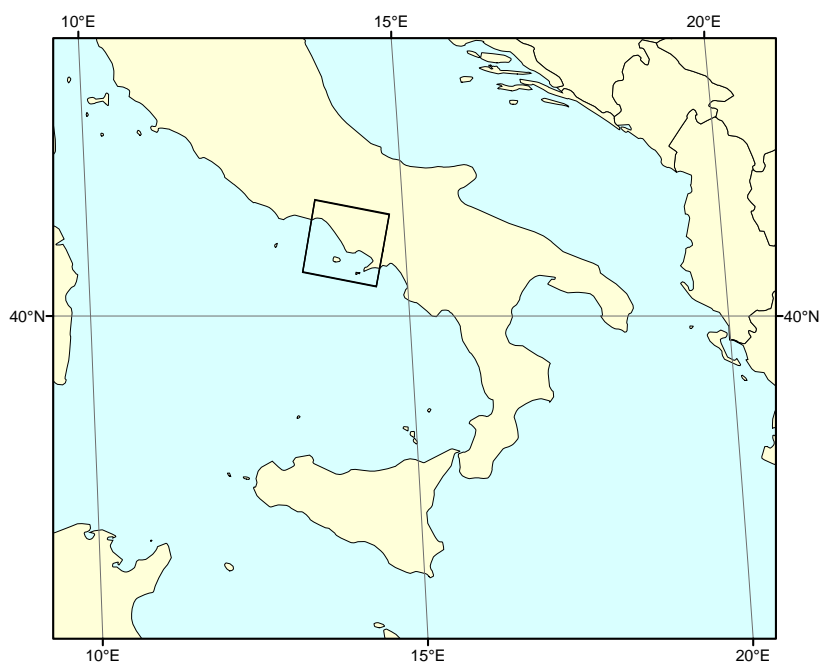


Figura 3.1: Dados ERS – mapa da área de extensão das imagens.

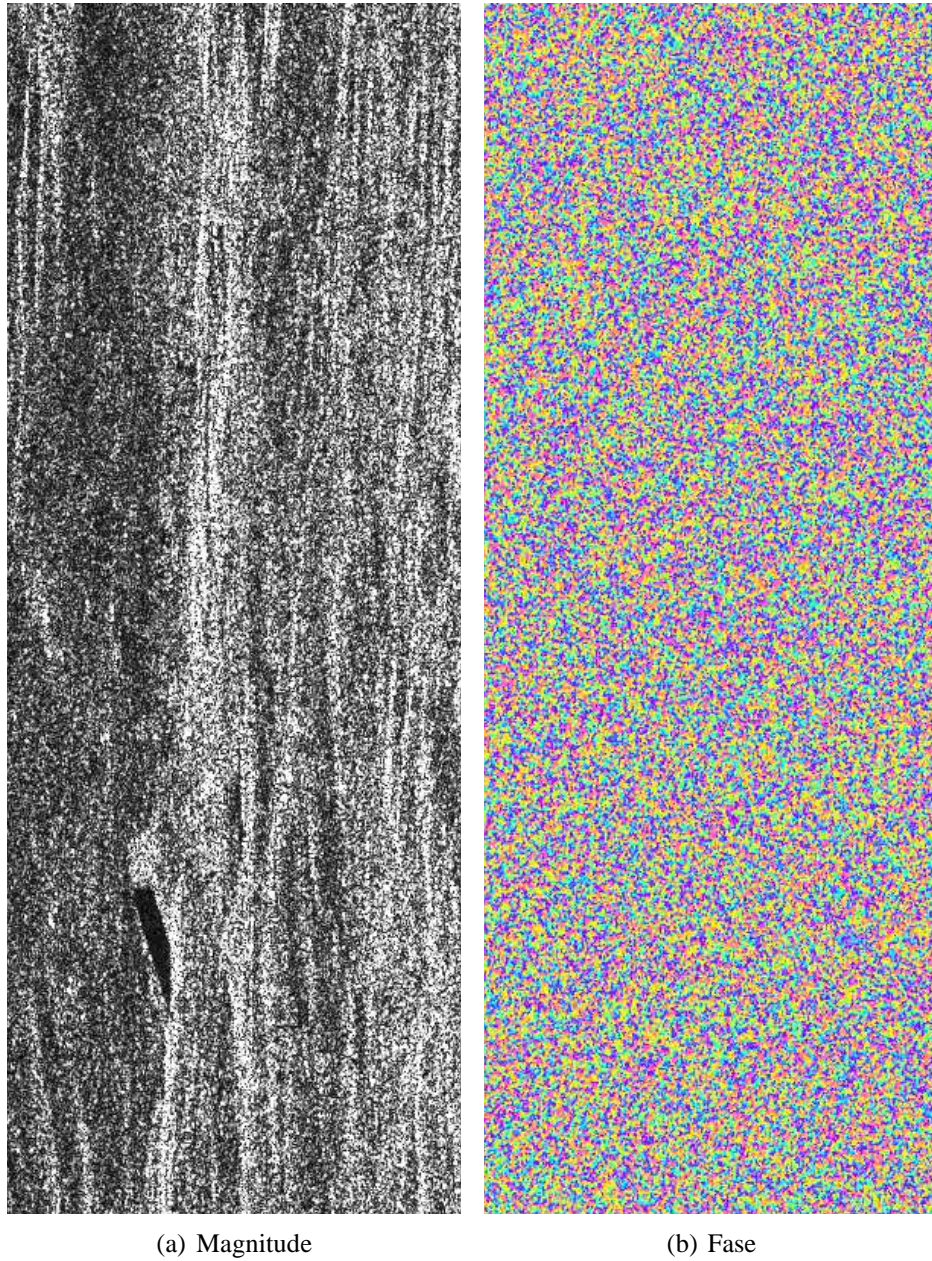
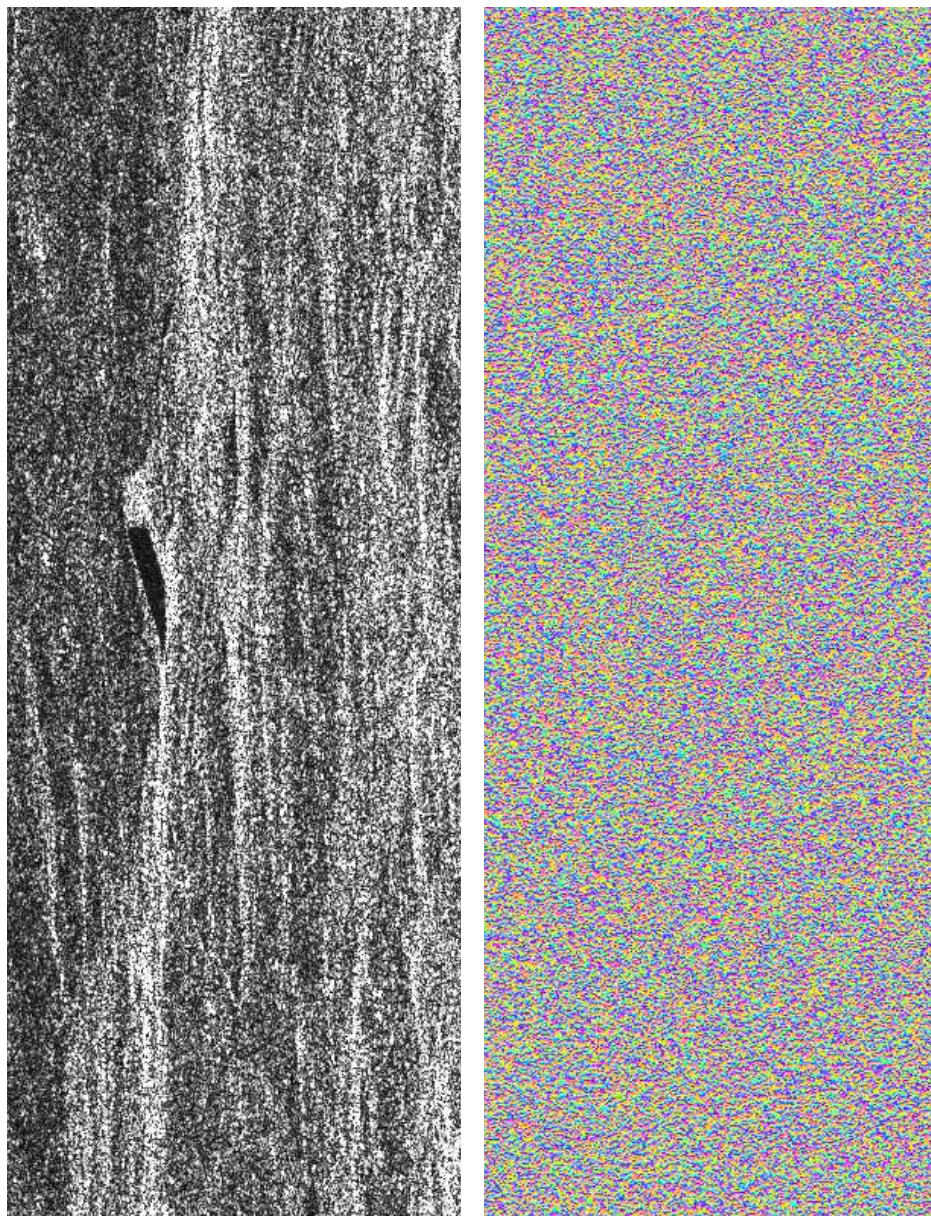


Figura 3.2: Dados ERS – imagem principal.



(a) Magnitude

(b) Fase

Figura 3.3: Dados ERS – imagem secundária.

	07/jun/2004	11/fev/2004
11/jun/2003	1000 m	440 m
03/dec/2003	570 m	0,6 m

Tabela 3.4: Dados ENVISAT – linhas de base perpendiculares entre pares das cenas da órbita descendente.

	25/jan/2004	29/fev/2004
16/nov/2003	30 m	2 m

Tabela 3.5: Dados ENVISAT – linhas de base perpendiculares entre pares das cenas da órbita ascendente.

Não encontramos documentação detalhada sobre tais dados.

3.1.3 Dados ENVISAT

A Agência Espacial Européia (ESA) disponibiliza gratuitamente para a comunidade científica um conjunto de dados coletados pelo satélite ENVISAT, que cobrem espaço- e temporalmente o terremoto que aconteceu no Irã em 26 de dezembro de 2003, próximo à cidade histórica de Bam². O conjunto de dados é composto de um DVD-ROM³ que inclui sete imagens *Single-Look Complex*. Três das imagens foram coletadas em uma órbita ascendente e quatro em uma órbita descendente. Foi decidido trabalhar apenas com três das sete imagens, cujos detalhes são apresentados nas tabelas 3.7, 3.8 e 3.9.

Estimativa das linhas de base perpendiculares foram disponibilizadas pela ESA, conforme tabelas 3.4 e 3.5.

3.2 Programas

A técnica InSAR ainda não desfruta de implementação generalizada em programas de processamento digital de imagens. P.ex., Gens (1998, Apêndice A) descreve os programas existentes e conhecidos publicamente em 1998, e naquela época havia apenas dezoito. Os programas existentes são em sua maioria produto de pesquisa e desenvolvidos por instituições acadêmicas. Apenas recentemente alguns programas foram disponibilizados livremente (KAMPES; HANSSSEN; PERSKI, 2003; ROSEN et al., 2004). Estas foram as únicas opções para a execução da parte prática deste trabalho. Foram obtidos dois programas, chamados DORIS e ROI_PAC. Ambos têm seu código-fonte disponível e podem ser executados em ambientes Unix e similares.

O programa DORIS⁴ (KAMPES; HANSSSEN; PERSKI, 2003; KAMPES; USAI, 1999) é de-

²Veja em http://envisat.esa.int/applications/la/bam_seism.html

³O DVD-ROM com as imagens ENVISAT será doado para a Biblioteca do Instituto de Geociências.

⁴Disponível em <http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>

Sentido da órbita	descendente
Ângulo de incidência	15,0 – 22,9 °
Frequência da radiação	5,3 GHz
Comprimento de onda da radiação	5,66660 cm

Tabela 3.6: Dados ENVISAT – parâmetros em comum para as imagens usadas.

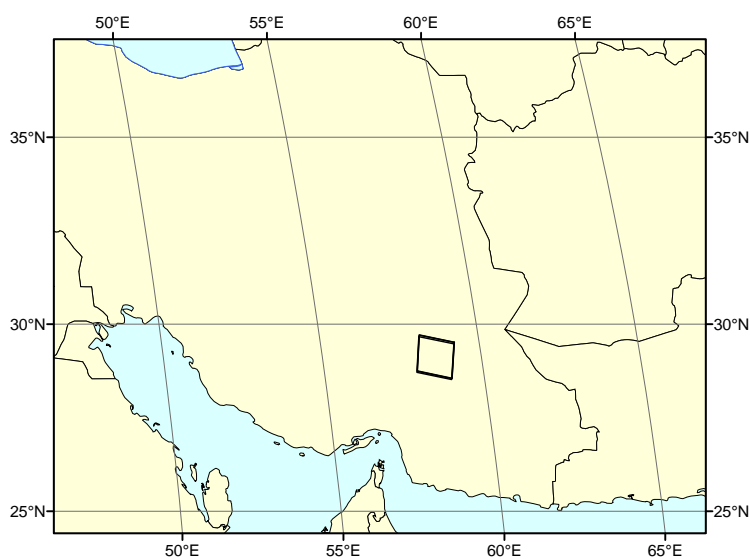


Figura 3.4: Dados ENVISAT – mapa da área de extensão das imagens.

Órbita	9192
Data de aquisição	03/dez/2003
Latitude do centro da cena	29,138499°N
Longitude do centro da cena	58,521873°E
Número de linhas	2446
Número de colunas	5167

Tabela 3.7: Dados ENVISAT – parâmetros da imagem principal.

Órbita	6687
Data de aquisição	11/jun/2003
Latitude do centro da cena	29,145563°N
Longitude do centro da cena	58,527438°E
Número de linhas	2445
Número de colunas	5167

Tabela 3.8: Dados ENVISAT – parâmetros da imagem secundária anterior ao terremoto.

Órbita	9693
Data de aquisição	07/jan/2004
Latitude do centro da cena	29,105278°N
Longitude do centro da cena	58,506575°E
Número de linhas	2417
Número de colunas	5167

Tabela 3.9: Dados ENVISAT – parâmetros da imagem secundária posterior ao terremoto.

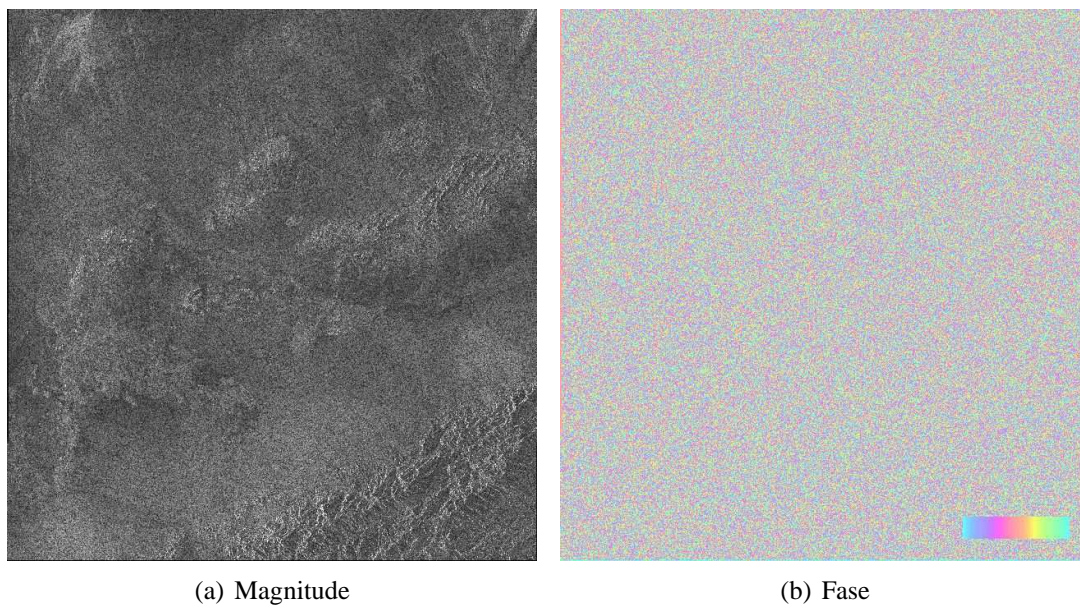


Figura 3.5: Dados ENVISAT – imagem principal.

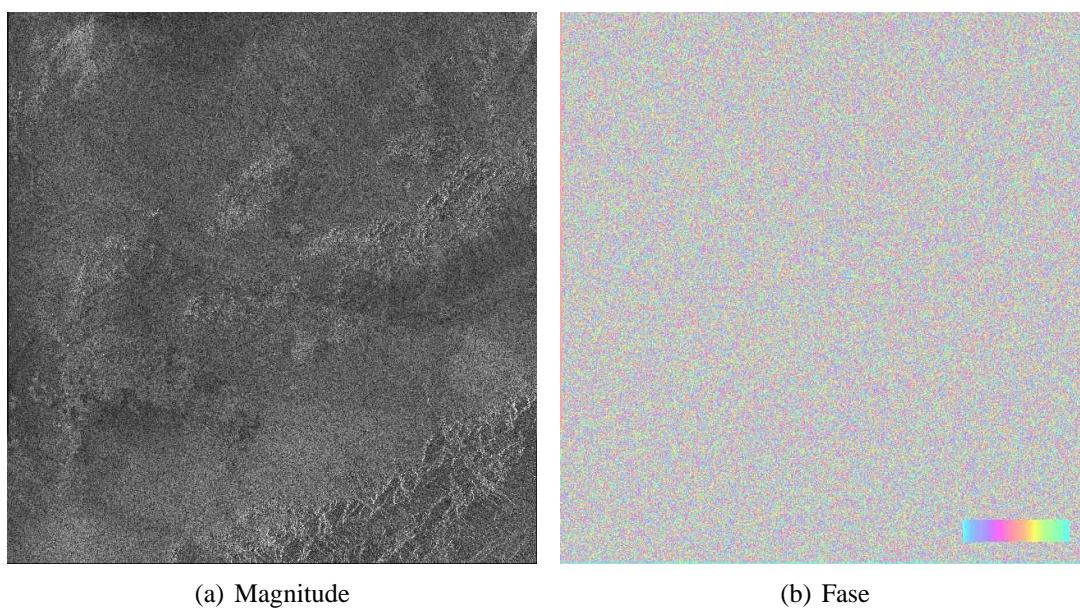


Figura 3.6: Dados ENVISAT – imagem secundária anterior ao terremoto.

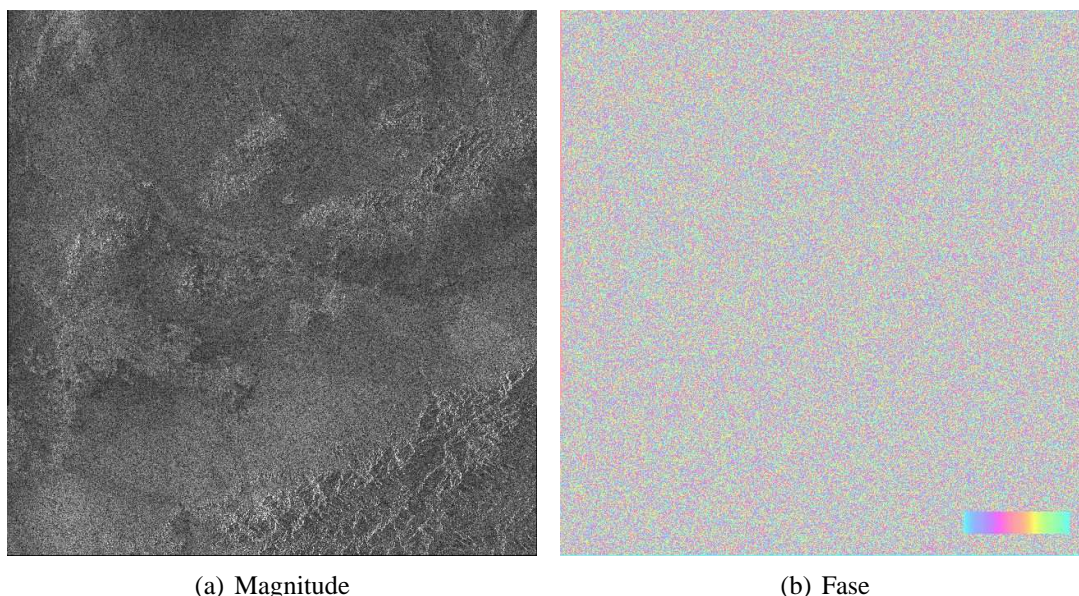


Figura 3.7: Dados ENVISAT – imagem secundária posterior ao terremoto.

envolvido desde 1998 no Departamento de Observação da Terra e Sistemas Espaciais da Universidade Técnica de Delft, na Holanda. Desde 1999 ele é disponibilizado gratuitamente na Internet, sujeito a uso não-comercial. Produtos interferométricos podem ser gerados a partir de dados *Single-Look Complex*.

O programa ROI_PAC⁵ (ROSEN et al., 2004) foi desenvolvido no Laboratório de Propulsão a Jato (JPL), do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), a serviço da Agência Espacial Norte-americana (NASA). Esse programa recebeu contribuições de muitos pesquisadores ao longo das últimas décadas, desde os trabalhos pioneiros em InSAR na década de 1980. A primeira versão pública do programa ROI_PAC foi lançada em 2000.

Foi escolhido usar apenas o programa DORIS, porque (i) o seu *download* pela Internet pode ser feito anonimamente (enquanto que o ROI_PAC exige o envio de um formulário assinado), (ii) pode ser instalado e usado completamente com software livre ou gratuito (o ROI_PAC precisa de compiladores Fortran 90, comerciais) e (iii) pode ser instalado em sistemas operacionais Microsoft Windows, através do uso de um ambiente de emulação Unix chamado Cygwin⁶ (o ROI_PAC apenas em sistemas operacionais Unix e Linux, que o DORIS também suporta).

3.2.1 Operação do programa DORIS

O programa DORIS é composto de um único executável que realiza todo o processamento. Apesar disso, o seu código-fonte é altamente modularizado. A sua operação é feita em linha de comando, sem uma interface gráfica para o usuário. O processamento é realizado como uma série de passos, e os resultados intermediários podem ser obtidos. Há três arquivos-texto que são usados para armazenar os parâmetros relevantes da imagem principal, da imagem secundária e dos produtos. Em cada passo do processamento tais arquivos podem ser lidos e atualizados pelo programa. Os parâmetros são, p.ex., nome do arquivo com a imagem, número de linhas e colunas, efemérides orbitais, método para a realização de cada passo, etc. Um exemplo é apresentado na tabela 3.10.

⁵Disponível em http://www.openchannelfoundation.org/projects/ROI_PAC

⁶Disponível em <http://www.cygwin.com/>

```

c
comment  ___general options___
c
SCREEN      debug // level of output to standard out
MEMORY 50 // MB
OVERWRITE OFF // overwrite existing files
BATCH ON // non-interactive
LISTINPUT ON // copy this file to log
c //
PROCESS     interfero //
PROCESS     comprefpha // estimate flatearth param.
PROCESS     subtrrefpha
PROCESS     coherence //
c //
c //
comment  ___the general io files___ //
c //
LOGFILE     log.out //
M_RESFILE   master.out // parameter pool
S_RESFILE   slave.out // parameter pool
I_RESFILE   interferogram.out // parameter pool
c //
c //
comment  ___product generation___ //
c //
INT_OUT_CINT cint.raw // optional complex int.
INT_MULTILOOK 5 1 // factor l,p
c //
c //
comment  ___ COMPUTE REF PHASE ___ //
c //
FE_METHOD   porbits //
FE_DEGREE   3 //
FE_NPOINTS  101 //
c //
c //
comment  ___ SUBTRREF PHASE ___ //
c //
SRP_OUT_CINT  cint.srp.raw //
SRP_MULTILOOK 1 1
c //
c //
STOP // mandatory

```

Tabela 3.10: Exemplo de arquivo texto para entrada de parâmetros no programa DORIS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada um dos conjuntos de dados descritos na seção 3.1 seus resultados são apresentados e discutidos abaixo.

Os dados originais, tanto do sensor ERS quanto do sensor ENVISAT, têm resoluções diferentes entre as direções de azimute e de alcance. A resolução em azimute é cerca de 5 m e a resolução em alcance (projetado no solo) é cerca de 25 m. Na prática, é comum reamostrar as imagens, agrupando e fazendo uma média a cada cinco pixels ao longo das colunas, para que os pixels tenham lados com aproximadamente o mesmo comprimento (25 m × 25 m). Esse fator de reamostragem às vezes é chamado *fator de visadas múltiplas*. Os resultados do processamento dos dados ERS são apresentados inicialmente na sua resolução original. Os resultados do processamento dos dados ENVISAT são apresentados desde o início reamostrados por um fator de cinco vezes e uma vez nas direções de azimute e de alcance, respectivamente.

4.1 Processamento dos dados ERS

O início do processamento interferométrico é o co-registro das imagens. Primeiro é calculada uma transformação entre as imagens, e depois essa transformação é aplicada.

Inicialmente os valores dos parâmetros da transformação entre as imagens principal e secundária são estimados com base nas efemérides orbitais (tabela 4.1). Os valores estimados indicam que o deslocamento entre as imagens é cerca de oitenta vezes maior na direção de azimute do que na direção de alcance. Entretanto, deve-se lembrar que a resolução na direção de azimute é cinco vezes maior que a resolução na direção de alcance. Considerando essa diferença, a razão entre os deslocamentos efetivos é de 15 vezes.

O próximo passo foi estimar, por correlação da magnitude, o deslocamento entre as imagens em alguns pontos na área de sobreposição das imagens, resultando nos vetores apresentados na figura 4.1(a) e resumido na tabela 4.2. Nota-se boa concordância (melhor que 2%) dos valores estimados por correlação com os estimados com base nas efemérides orbitais.

O deslocamento entre as imagens é novamente estimado por correlação da magnitude, mas desta vez em um número muito maior de pontos espalhados nas imagens (figura 4.1(b)). Os deslocamentos estimados nesse passo tem precisão de 1 centésimo de pixel, enquanto que no passo anterior a precisão era de apenas pixels inteiros (tabela omitida).

O último passo no cálculo da transformação entre as imagens é o ajuste (pelo método dos mínimos quadrados) dos parâmetros de um polinômio (de segundo grau), aos deslocamentos amostrados no passo anterior. Os valores ajustados e seus desvios padrão são apresentados na tabela 4.3. Nota-se que os parâmetros constantes ($\alpha_{0,0}$) têm valores

próximos aos estimados nos passos anteriores. Os resíduos desse polinômio são apresentados na figura 4.1(c). Nota-se que a magnitude desses resíduos é pequena em relação aos deslocamentos amostrados.

Uma vez calculada a transformação necessária para registrar a imagem secundária à principal, ela é aplicada, reamostrando a imagem secundária. O resultado é apresentado na figura 4.2.

Com as imagens co-registradas, foi calculado o interferograma, que é apresentado em seu estado bruto na figura 4.3. Nota-se claramente franjas ao longo da direção de azimute. É interessante rever a fase das imagens que compõem o par (figuras 3.2 e 3.3): aparentemente, a fase é aleatória espacialmente; entretanto, manipulando-a de forma adequada, as franjas são reveladas. Imediatamente depois de calculado, o interferograma foi reamostrado com um fator de visadas múltiplas igual a 5 na direção de azimute, para obter pixels com lados de igual comprimento e também para reduzir o tamanho dos dados (em bytes), resultando na figura 4.4.

A maior variação nas franjas observadas na figura 4.4 é devida ao aumento natural na distância ao longo da direção de alcance, à medida que o ângulo de elevação ao alvo aumenta. Devemos remover esta rampa, para ficar apenas com a variação devida (na maior parte) à variação na altura da superfície imageada. Fazemos isso calculando a diferença de fase que seria observada se a Terra fosse lisa (considerando um modelo elipsóidico), e então subtraindo este valor modelado do observado. A figura 4.5 apresenta o interferograma modelado, claramente sintético por causa da ausência de ruído. A diferença dos dois é apresentada na figura 4.6, no qual variações menores são agora perceptíveis.

Nota-se no último interferograma a presença de ruídos, porque supõe-se que o valor da diferença de fase deveria variar gradualmente entre os pixels. O ruído de alta frequência foi removido por um filtro passa-baixa, implementado no domínio espacial como uma média móvel com largura de três pixels. O resultado é apresentado na figura 4.7.

O passo seguinte foi o cálculo da imagem de coerência correspondente ao interferograma. A medida de coerência é de fundamental importância, porque, se fossemos avaliar a qualidade dos mapas gerados, ela seria uma estimativa da confiabilidade das medidas de diferença de fase. Nesta imagem (figura 4.8), a coerência varia de 0 a 1 numa escala que vai do preto ao branco, respectivamente.

As filtragens realizadas no interferograma e o cálculo da coerência facilitam o desenrolamento da fase. Neste passo, a fase de cada pixel é conectada à fase dos pixels vizinhos, adicionando à ele um múltiplo de 2π . O resultado é apresentado na figura 4.9, em uma escala de cores diferente da utilizada nos interferogramas anteriores, porque agora a diferença de fase assume valores maiores que 2π .

O passo seguinte foi a resolução da ambigüidade inteira na diferença de fase, i.e., a determinação de um múltiplo inteiro de 2π , *uniforme* para o interferograma, que deve ser adicionado à fase desenrolada para obter uma diferença de fase absoluta, proporcional à diferença na distância percorrida pelos sinais nas duas observações. Da forma como é implementado no programa DORIS, este passo obtém diretamente a altura (elipsóidica) dos alvos ao invés da diferença de fase absoluta. O resultado é apresentado na figura 4.10, com os eixos da imagem ainda no sistema do radar (azimute \times alcance).

O último passo do processamento interferométrico é a geo-codificação dos alvos a partir das observações. Como vimos nas seções 2.2 e 2.4, o radar de abertura sintética nos fornece duas observações (deslocamento Doppler e distância de alcance direto, que são obtidos a partir das coordenadas linha e coluna na imagem) e a interferometria nos fornece uma terceira observação. O resultado é uma massa de pontos, em número igual ao

(l, p)	$(-236, -3)$
----------	--------------

Tabela 4.1: Dados ERS – deslocamento entre imagens determinado com efemérides orbitais.

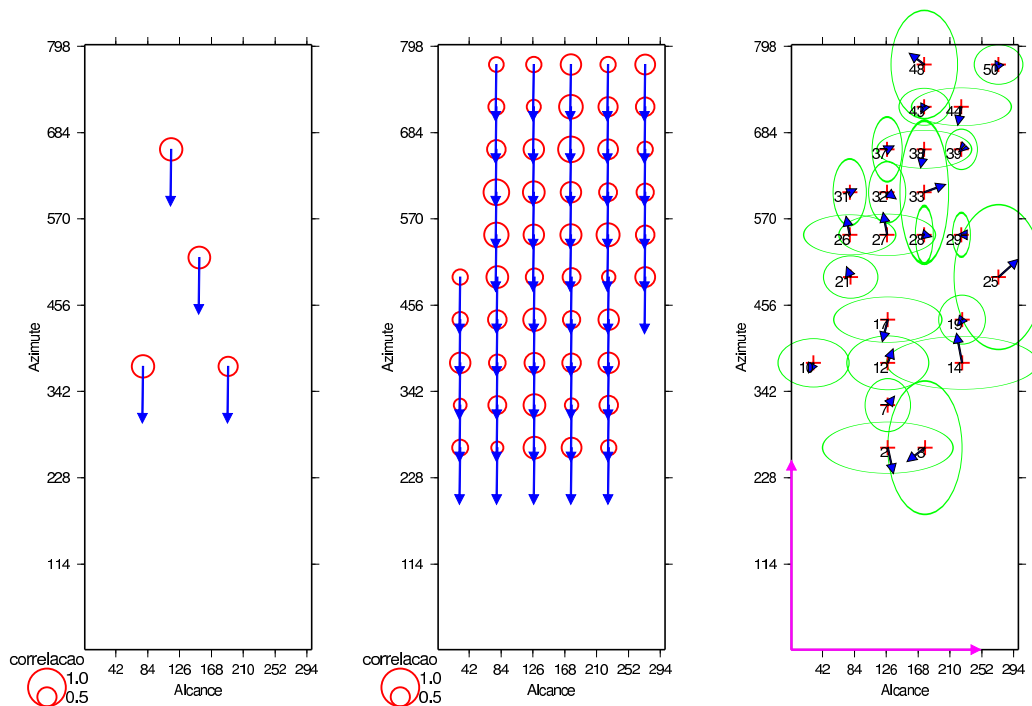
(l, p)	$(-241, -3)$
----------	--------------

Tabela 4.2: Dados ERS – deslocamento entre imagens determinado por correlação da magnitude – amostragem grosseira.

número de pixels do interferograma, apresentados em projeção cartográfica na figura 4.11. Nota-se claramente que a transformação de linha-coluna para coordenadas planimétricas é altamente irregular. Nota-se também a alta densidade dos pontos medidos, obtidos todos ao mesmo tempo durante o processamento de um único par interferométrico, o que é uma grande vantagem da técnica de InSAR.

Um passo adicional, que não pertence ao processamento interferométrico mas é muito comum, é a geração de uma superfície representada por uma grade regular de valores de elevação, a partir dos pontos irregularmente espaçados determinados no passo anterior. A escolha do interpolador a ser aplicado na geração dessa grade é fundamental, porque diferentes interpoladores produzem diferentes superfícies a partir do mesmo conjunto de pontos. Entretanto, esta escolha está bem além do escopo deste trabalho. Na figura 4.12 é apresentada a grade gerada com o interpolador vizinhos naturais (i.e., triangulação de Delaunay seguida de interpolação linear), com as curvas de nível extraídas desta grade sobrepostas. Na figura 4.13 é apresentada a mesma superfície, desta vez em perspectiva.

É interessante notar a presença de um artefato decorrente do imageamento ativo realizado pelo radar: a presença de regiões com densidade maior e densidade menor de pontos. Para explicá-lo, é preciso lembrar que as imagens foram coletadas em uma órbita descendente, i.e., de norte para sul, portanto do topo para a parte de baixo da figura, e que o sensor ERS tem visada lateral para a direita da sua linha de vôo, portanto da direita para a esquerda na figura, ao longo da diagonal (veja o esquema na figura 4.14). Foi calculado um modelo de iluminação pelo radar (figura 4.15), a partir do mapa de elevação gerado neste trabalho. A fonte de iluminação foi colocada aproximadamente na posição do radar (azimute 107° , estimado pela diagonal do mapa de elevação, e ângulo de elevação igual a 67° , estimado pelo complemento do ângulo de incidência médio do ERS); nessa figura, a cor dos pixels varia do branco (iluminação máxima) ao preto (sem iluminação). Assim, comparando as figuras 4.14 e 4.15, é mostrado claramente que as regiões de maior densidade de pontos correspondem às regiões mais iluminadas pelo radar. Também o diagrama de dispersão entre as duas imagens, apresentado na figura 4.16, indica essa correlação positiva entre a iluminação do radar e a densidade de pontos geo-codificados.



(a) Deslocamento entre imagens – amostragem grosseira. (b) Deslocamento entre imagens – amostragem fi na. (c) Resíduos do ajustamento da função de transformação modelada.

Figura 4.1: Dados ERS – transformação entre imagens.

(a) Função para deslocamento na direção de azimute.

Parâmetro	Valor estimado	Desvio padrão
$\alpha_{0,0}$	-238,6118	17,7204
$\alpha_{1,0}$	1,5402	9,5726
$\alpha_{1,1}$	-0,2423	4,2015

(b) Função para deslocamento na direção de alcance.

Parâmetro	Valor estimado	Desvio padrão
$\alpha_{0,0}$	-3,5924	314,0110
$\alpha_{1,0}$	-0,2191	91,6349
$\alpha_{1,1}$	0,0294	17,6524

Tabela 4.3: Dados ERS – parâmetros das funções ajustadas para transformação entre as imagens.

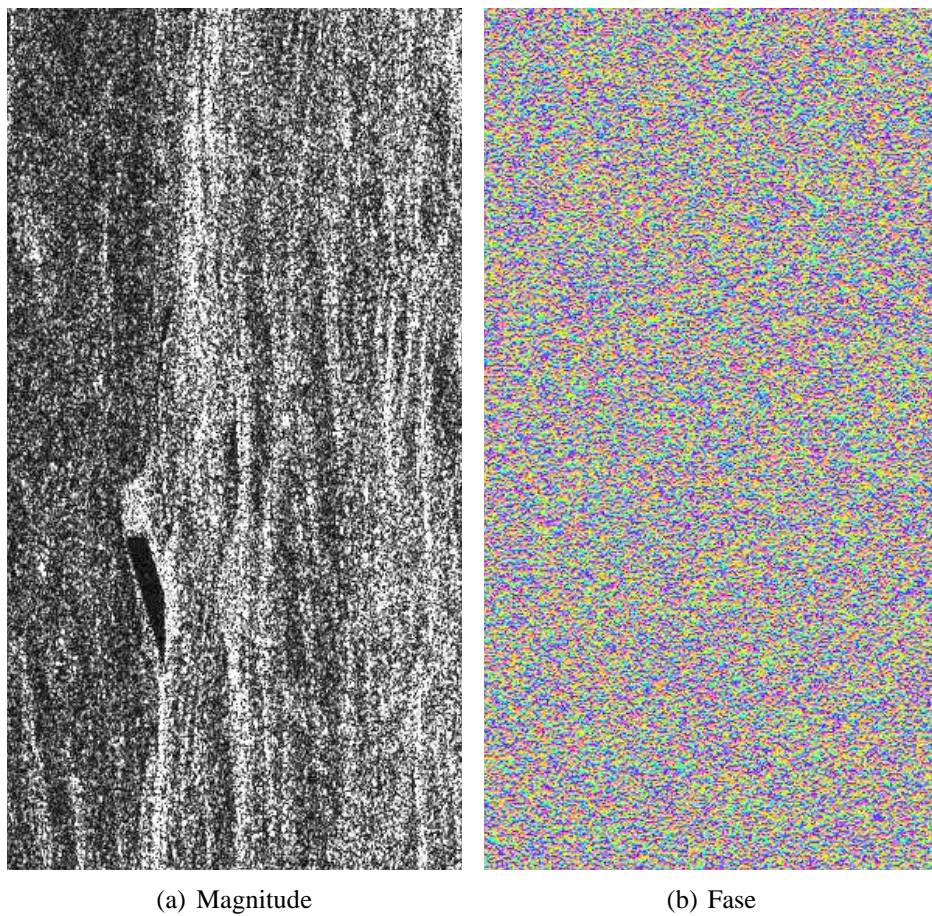


Figura 4.2: Dados ERS – imagem secundária reamostrada para registrá-la à imagem principal.

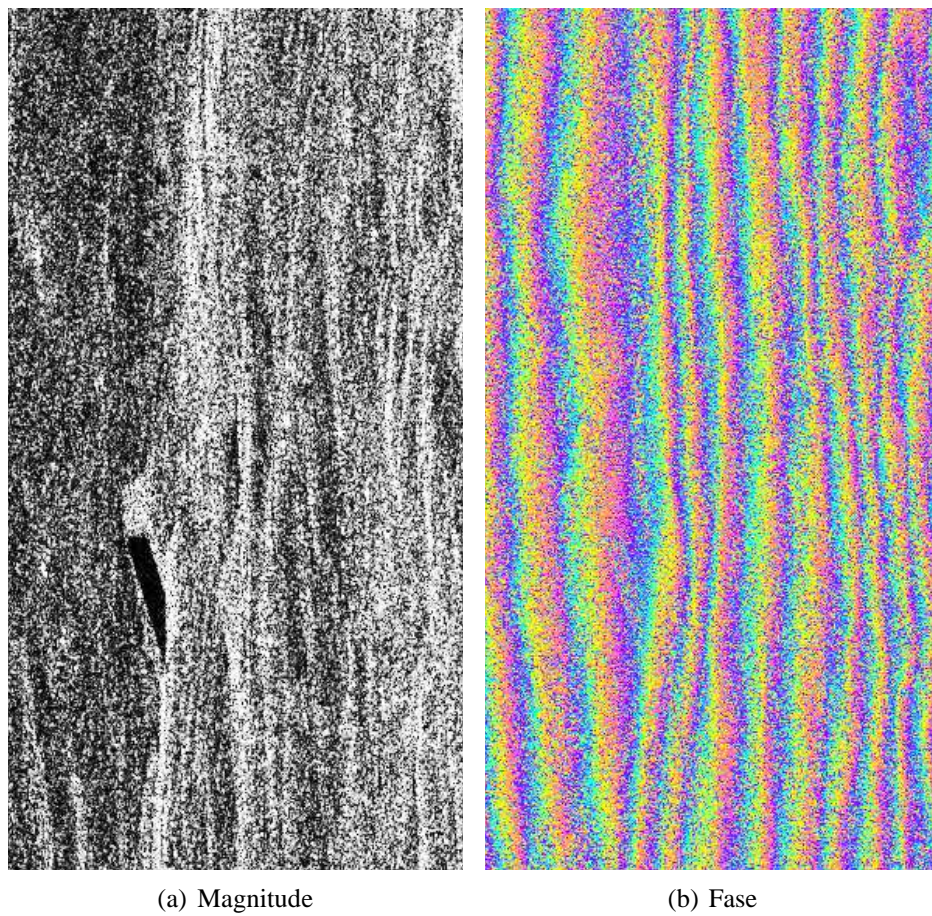


Figura 4.3: Dados ERS – interferograma “bruto”.

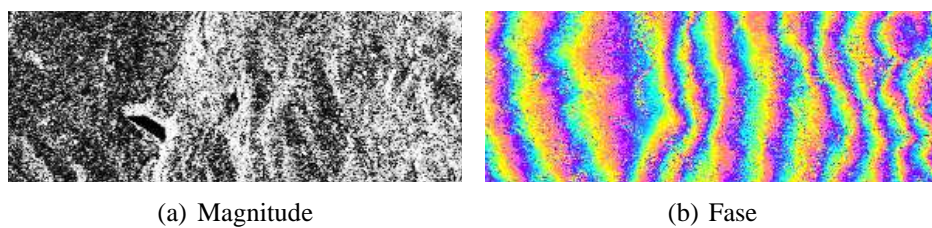


Figura 4.4: Dados ERS – interferograma reamostrado com fator de visadas múltiplas $(l,p) = (5,1)$.



Figura 4.5: Dados ERS – interferograma sintético da fase devida à forma elipsóidica da Terra.

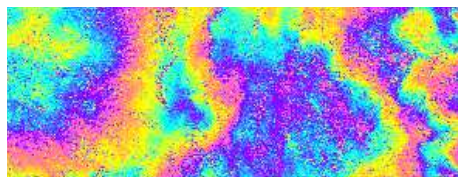


Figura 4.6: Dados ERS – interferograma com fase devida à forma elipsóidica da Terra removida.

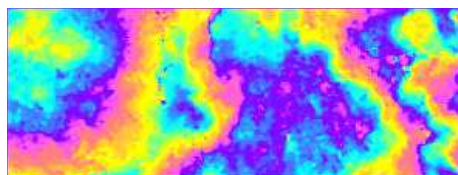


Figura 4.7: Dados ERS – interferograma filtrado por convolução espacial (janela de média móvel com largura de 3 pixels).



Figura 4.8: Dados ERS – imagem de coerência do interferograma.



Figura 4.9: Dados ERS – interferograma com fase desenrolada.

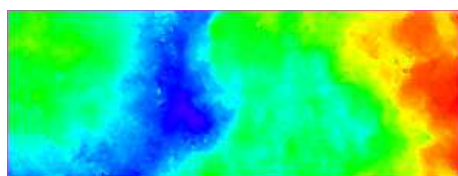


Figura 4.10: Dados ERS – altura dos pontos no sistema de coordenadas do radar (direções de alcance e de azimute).

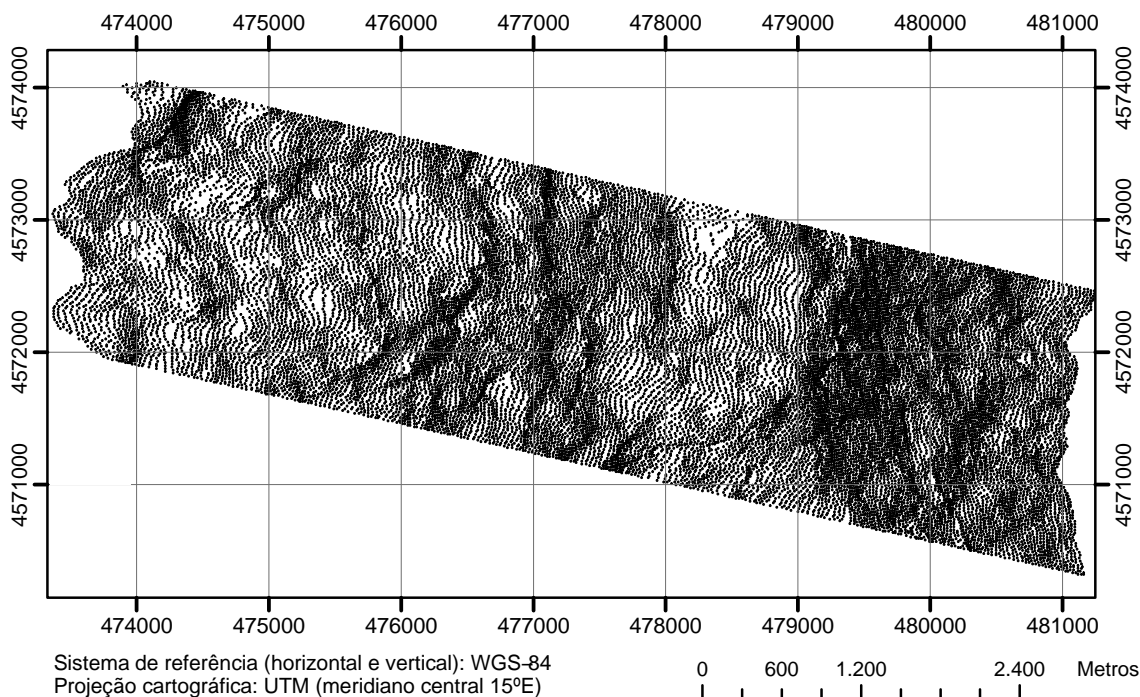


Figura 4.11: Dados ERS – pontos resultantes da geo-codificação dos pixels.

4.2 Processamento dos dados SIR-C

Não foi possível realizar o processamento dos dados SIR-C, porque infelizmente o programa DORIS não é capaz de ler prontamente tais imagens. O programa até poderia ser adaptado para tal, mas isso não foi feito porque havia outros dados disponíveis para processamento.

4.3 Processamento dos dados ENVISAT

Enquanto que o processamento dos dados ERS enfatizou a geração de um mapa de elevação, o processamento dos dados ENVISAT enfatizou a geração de um mapa de deformação, através da técnica de interferometria diferencial (conforme seção 2.6.2).

Foram utilizadas três imagens SAR, duas obtidas antes e uma depois de um terremoto, conforme descrito na seção 3.1.3. Uma das imagens anteriores ao evento foi escolhida como principal; as outras duas imagens formaram, cada uma, um par com a imagem principal. O par formado por duas imagens anteriores ao evento foi chamado par topográfico, e o par formado por uma imagem anterior e outra posterior ao evento foi chamado par de deformação. Cada par foi processado em separado, e depois teve seus resultados finais combinados na interferometria diferencial¹.

O processamento do par topográfico iniciou com o registro da imagem secundária à principal. As amostras de deslocamento entre as imagens foram coletadas por correlação da magnitude e são apresentadas nas figuras 4.17(a) e 4.17(b). Foram ajustados dois polinômios bi-dimensionais a tais amostras (um polinômio para cada direção), cujos resíduos do ajustamento são apresentados na figura 4.18. Com base nesse polinômio de

¹As imagens complexas serão apresentadas como uma única figura (ao invés de uma figura para fase e outra para magnitude), com a fase colorida sobreposta à magnitude em tons de cinza. Onde a fase não for ruidosa ela aparecerá mais do que a magnitude.

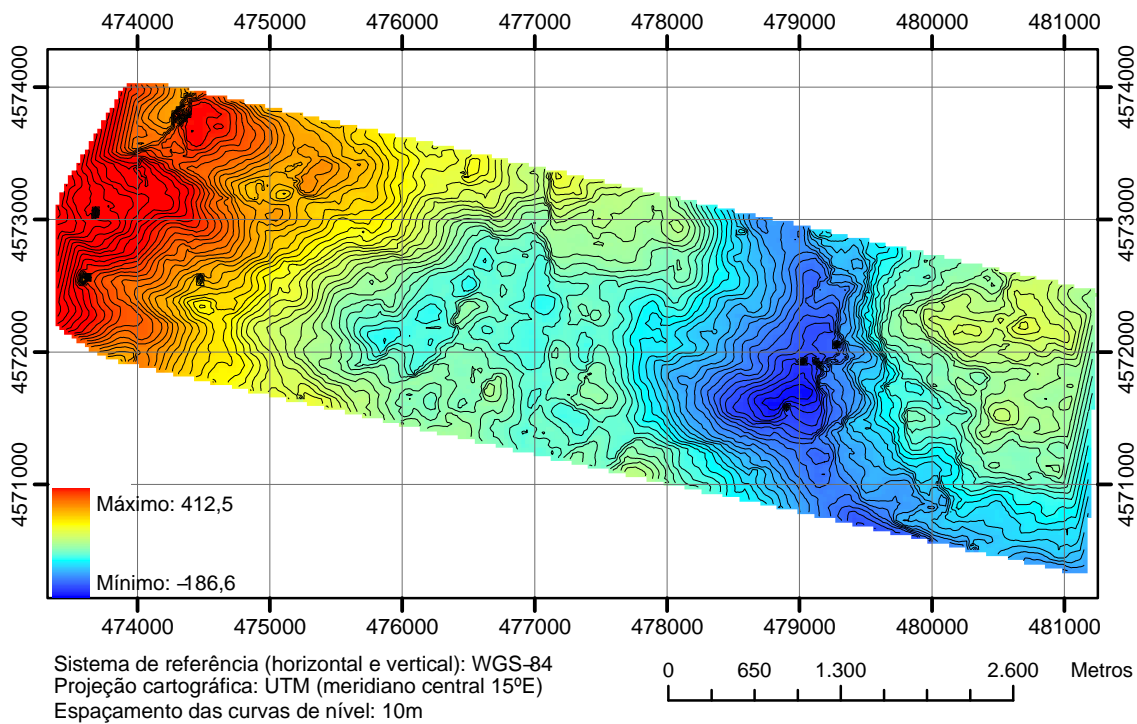


Figura 4.12: Grade gerada por interpolação dos pontos geo-codificados (as curvas de nível extraídas da grade estão sobrepostas).

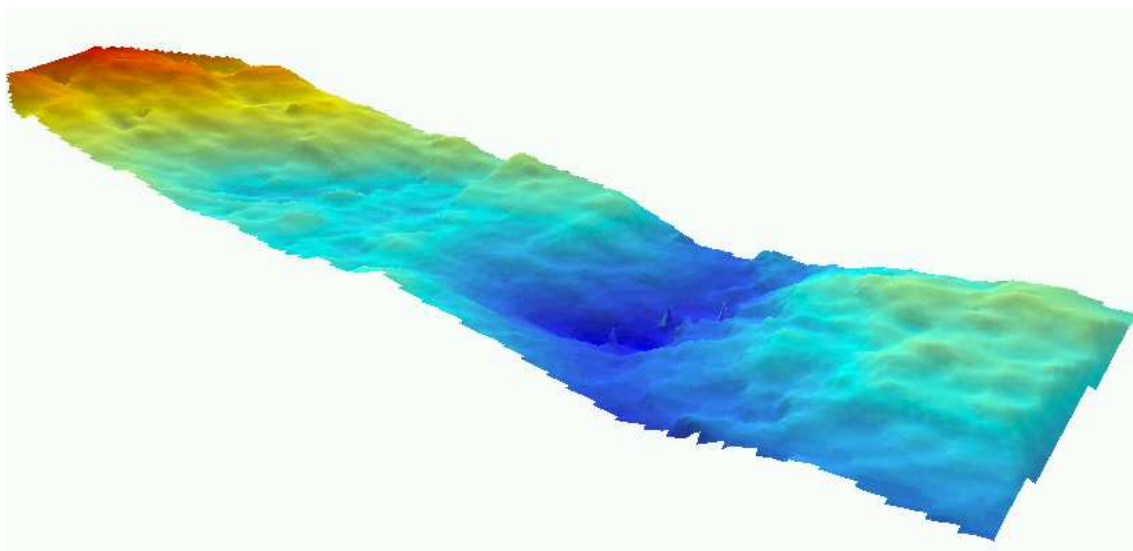


Figura 4.13: Grade em perspectiva (escala vertical exagerada em 50%).

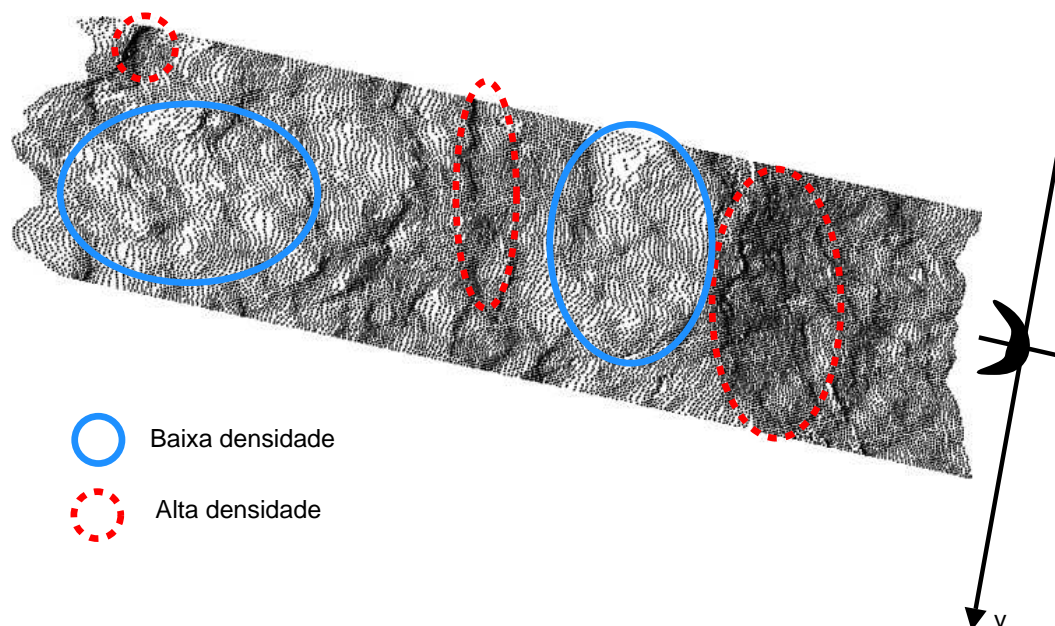


Figura 4.14: Dados ERS – Pontos observados a partir da linha de vôo e linha de visada do radar.

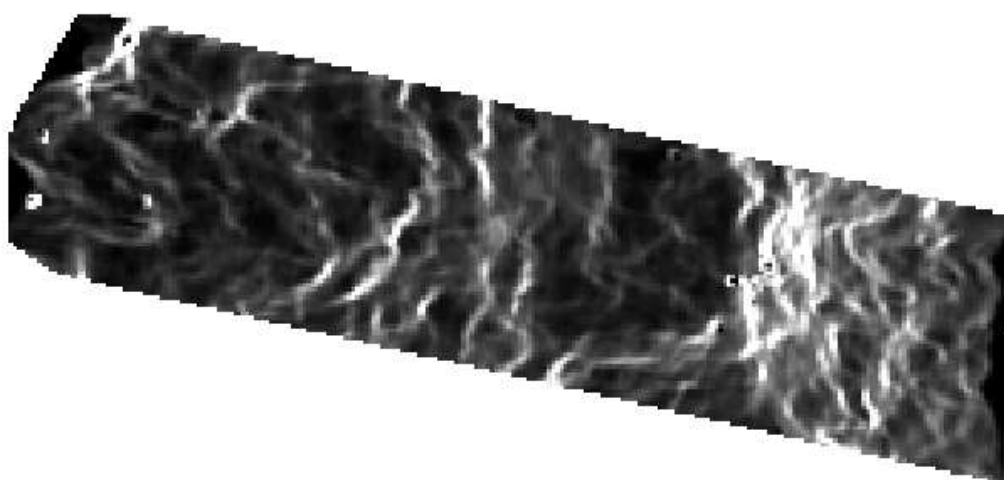


Figura 4.15: Dados ERS – Modelo de iluminação pelo radar. (A fonte de iluminação está a 107° de azimute (ângulo horário a partir do norte) e 67° de elevação.)

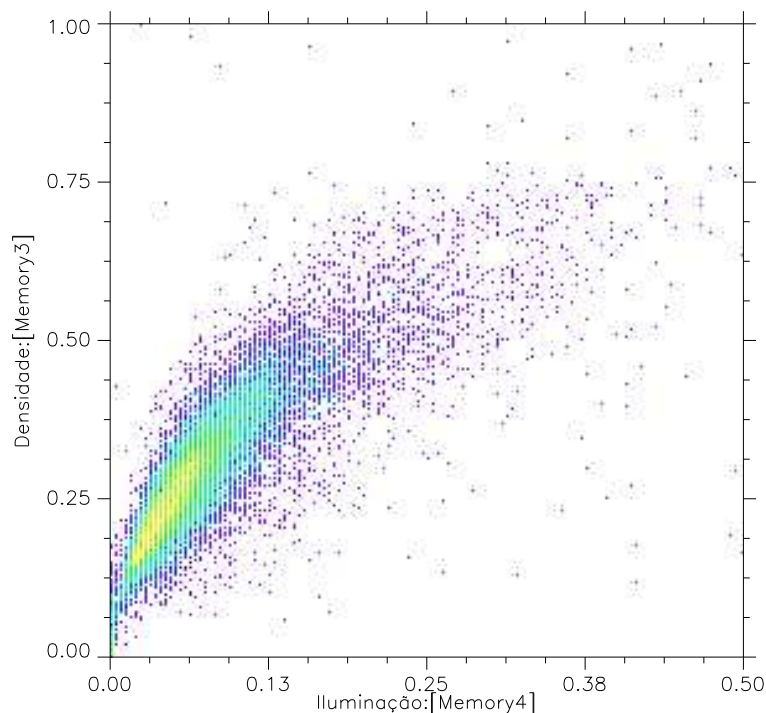


Figura 4.16: Dados ERS – diagrama de dispersão entre modelo de iluminação pelo radar e densidade de pontos geo-codificados.

transformação de coordenadas e em um interpolador, a imagem secundária foi registrada à principal. O resultado está na figura 4.19. O próximo passo foi o cálculo do interferograma (figura 4.20), seguido da remoção da sua componente devida à forma elipsóidica da Terra (figura 4.21), obtendo o resultado apresentado na figura 4.22. A coerência do interferograma foi calculada (figura 4.24) e o interferograma foi filtrado através de um filtro de convolução espacial (média móvel com 5 pixels de largura, figura 4.23). Por último, o interferograma filtrado foi desenrolado, cujo resultado é apresentado na figura 4.25.

O mesmo procedimento, com exceção do desenrolamento da fase, foi executado para o par de deformação. Os resultados do co-registro são apresentados nas figuras 4.26 e 4.27. Os resultados finais obtidos são apresentados nas figuras 4.28 (interferograma sem componente devida à forma elipsóidica da Terra e filtrado) e 4.29 (coerência do interferograma).

Nos dois interferogramas finais obtidos em cada par, pode-se notar claramente o contorno da topografia através das franjas de interferência. De fato, essas franjas podem ser interpretadas, de forma aproximada, como curvas de nível de um mapa topográfico.

A obtenção do mapa de deformação baseia-se na suposição de que o interferograma do par topográfico não contém componente devida ao deslocamento dos alvos, que está presente no interferograma do par de deformação. Subtraindo o primeiro interferograma do segundo obtemos um interferograma diferencial. Como os dois pares compartilham a mesma imagem principal, eles já estão co-registrados. Entretanto, o interferograma do par topográfico precisa ter sua escala alterada, da forma explicada na seção 2.6.2. O interferograma diferencial é apresentado na figura 4.30, e a sua versão desenrolada é apresentado na figura 4.31.

Notam-se claramente dois lóbulos, apresentados em detalhe na figura 4.32. Na versão desenrolada, vemos que o lóbulo de baixo (em azul) é uma região de diminuição na diferença de fase; portanto houve uma aproximação dos alvos naquela região em relação

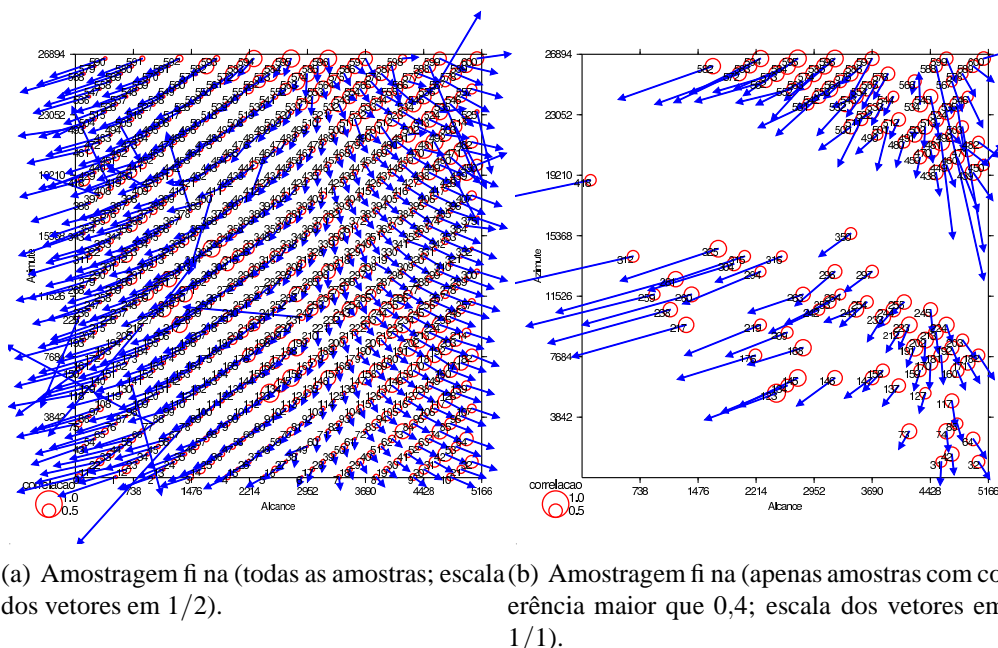


Figura 4.17: Dados ENVISAT, par topográfico – deslocamento entre imagens.

ao radar no período entre as observações. Já o lóbulo de cima (em vermelho) é uma região de aumento na diferença de fase; portanto, houve um afastamento dos alvos naquela região em relação ao radar no período entre as observações. Contando as franjas no recorte e multiplicando esse número por meio comprimento de onda do radar, obtemos uma estimativa do deslocamento do solo *na direção da linha de visada* do radar: 28 cm de aproximação e 16,5 cm de afastamento. Entretanto, com apenas um interferograma diferencial não podemos afirmar qual a direção ou a magnitude do deslocamento completo.

Recentemente Wang et al. (2004) e Talebian et al. (2004) apresentaram interpretações geológicas para esse deslocamento observado por InSAR. Eles testaram suas interpretações comparando o deslocamento observado com o deslocamento previsto pelos seus modelos, e os resíduos encontrados em geral foram pequenos. Ambos concordam que trata-se de um deslocamento ocorrido durante o terremoto (i.e., co-sísmico), devido à ruptura de uma falha principal de deslocamento horizontal (i.e., transcorrente), dextró-gira, localizada ao longo da linha de discontinuidade da fase interferométrica diferencial. Esta falha geológica não era conhecida previamente (i.e., não apresentava vestígios na superfície), e foi descoberta através da aplicação da técnica InSAR.

Um mapa de deformação não foi obtido porque seria necessário elaborar um modelo do deslocamento ocorrido, supondo a direção para estimar a magnitude, o que está fora do escopo desse trabalho.

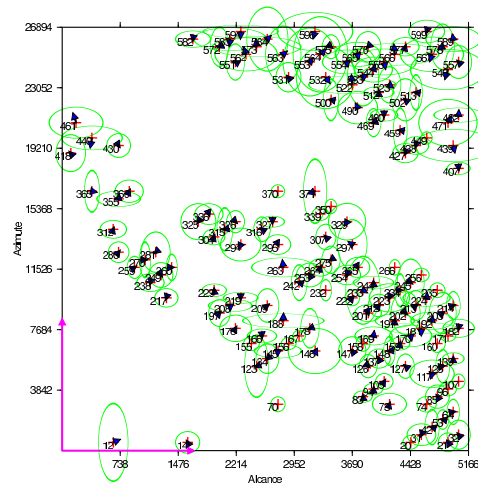


Figura 4.18: Dados ENVISAT, por topográfico – resíduos do ajustamento do polinômio de transformação entre imagens (apenas amostras com coerência maior que 0,4; escala dos vetores em 1/1).

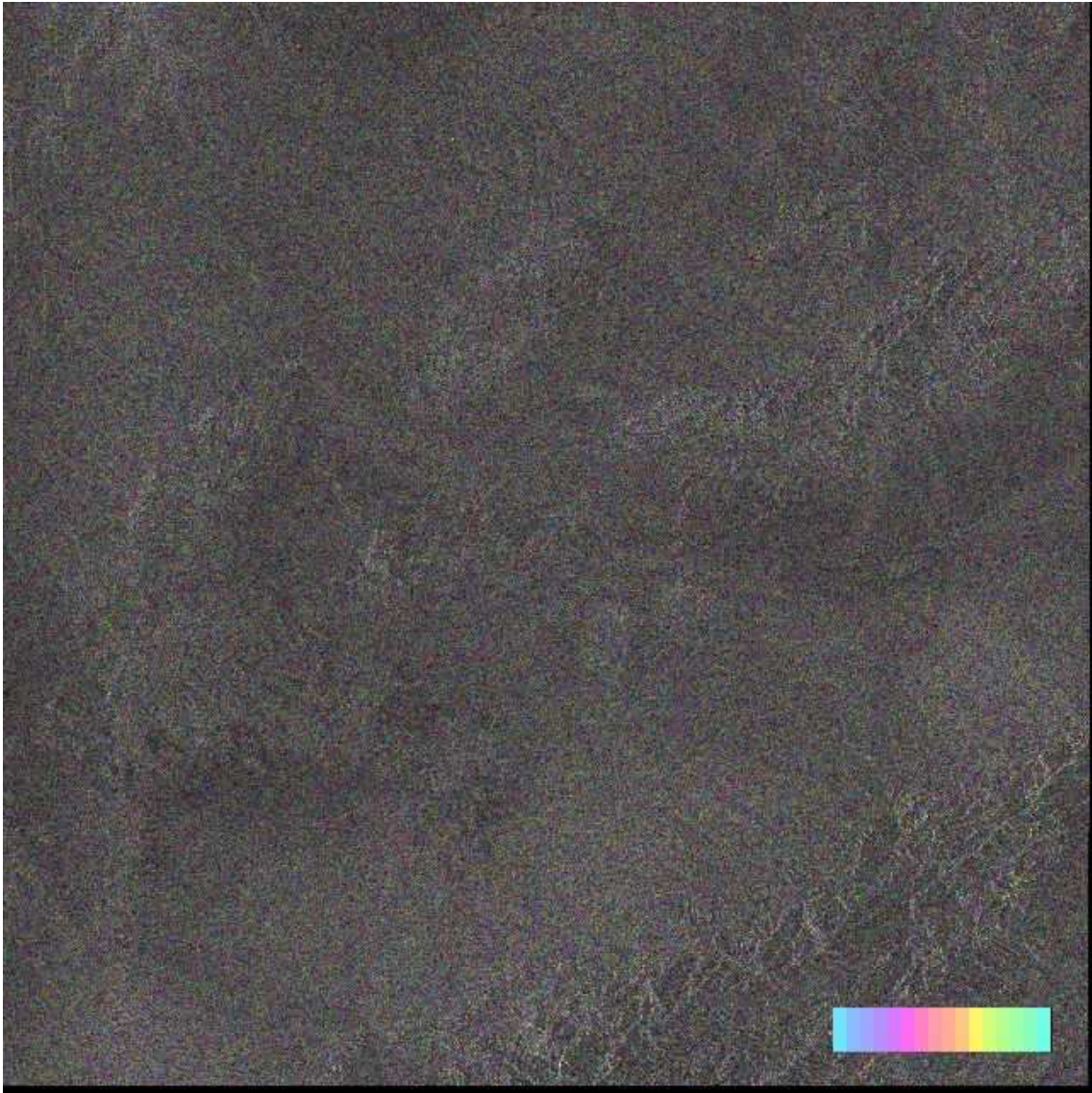


Figura 4.19: Dados ENVISAT, par topográfico – imagem secundária reamostrada para registrá-la à imagem principal.

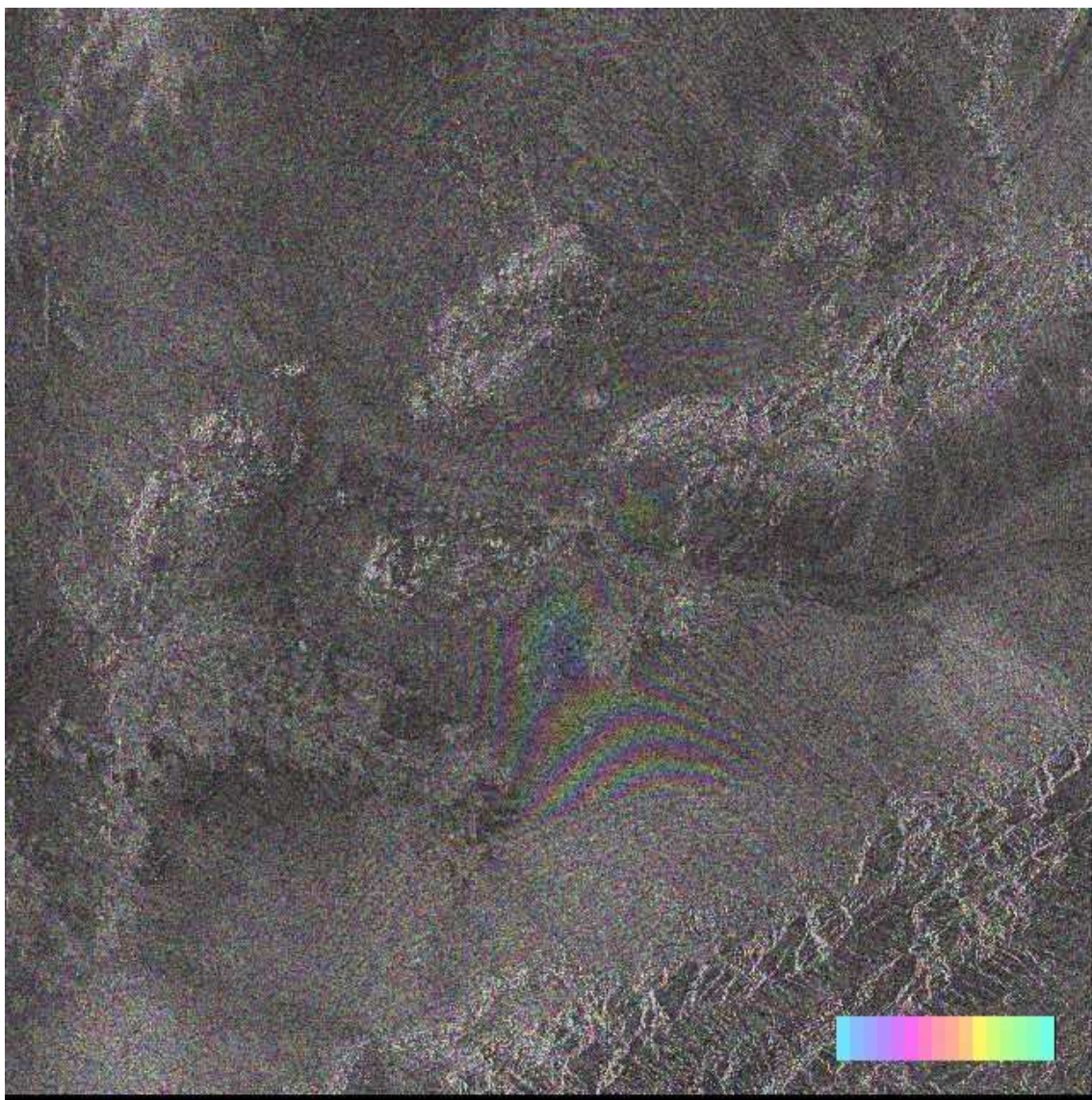


Figura 4.20: Datos ENVISAT, par topográfico – interferograma “bruto”.

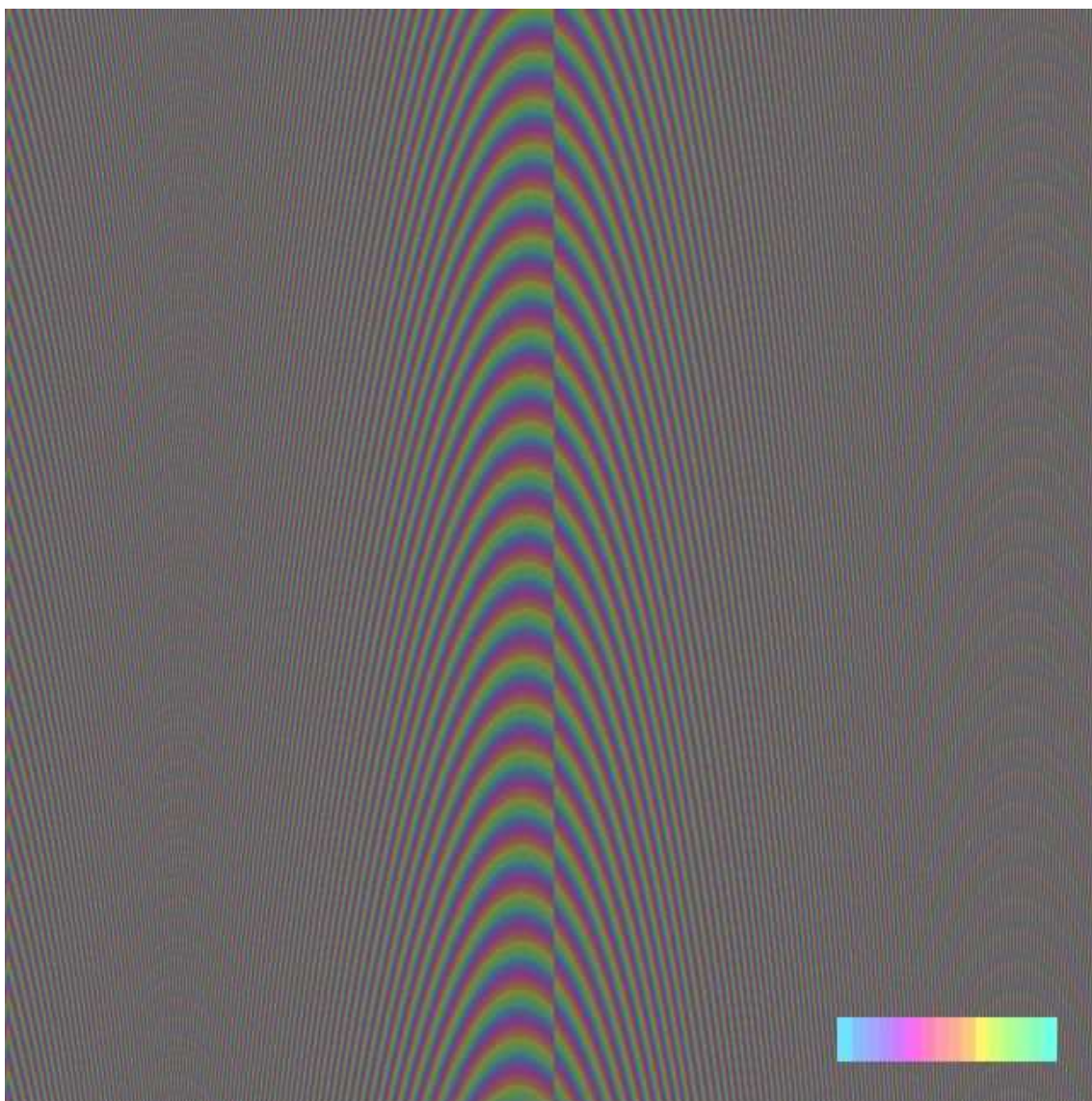


Figura 4.21: Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma sintético da fase devida à forma elipsóidica da Terra.

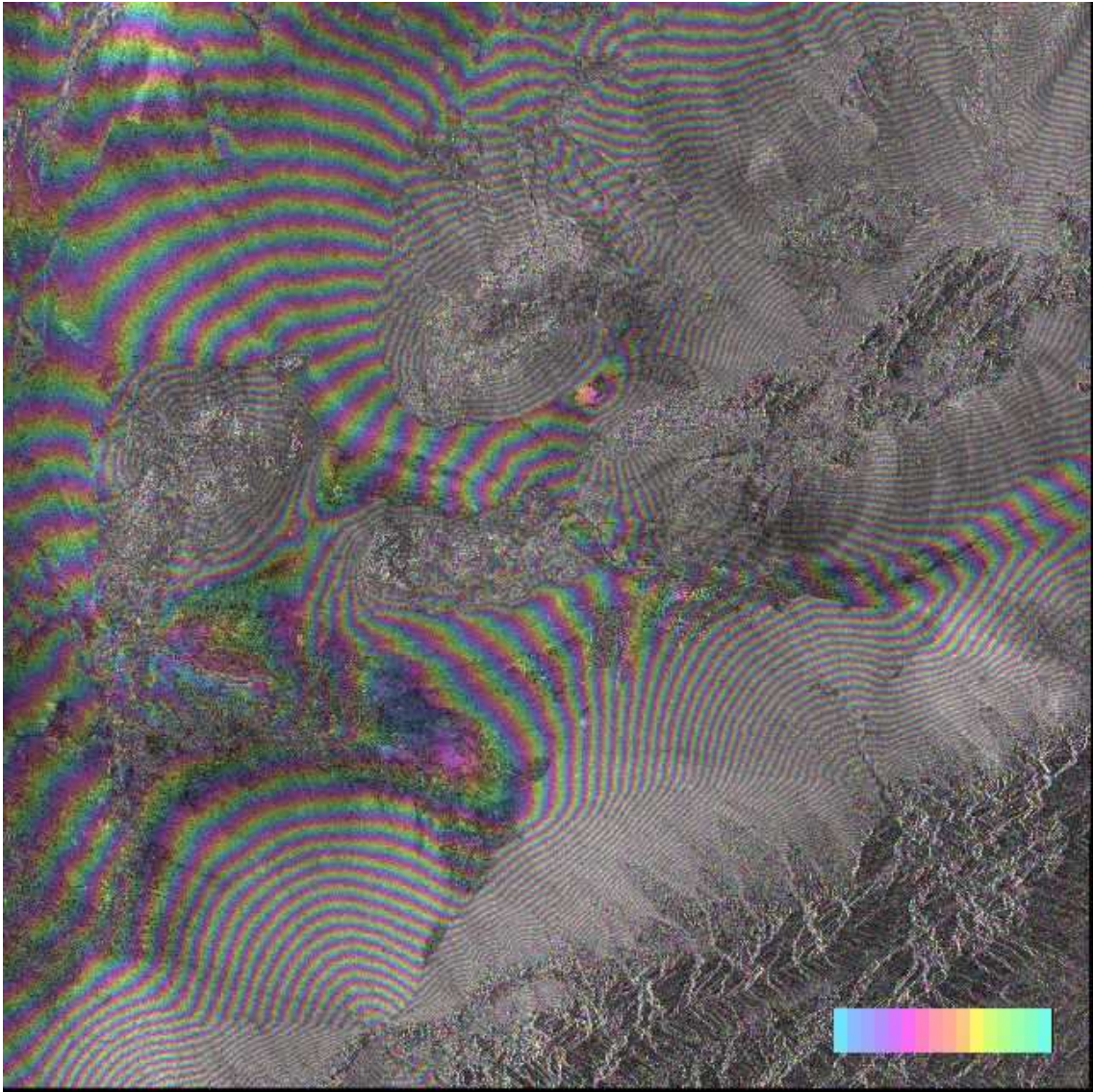


Figura 4.22: Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma com fase devida à forma elipsóidica da Terra removida.

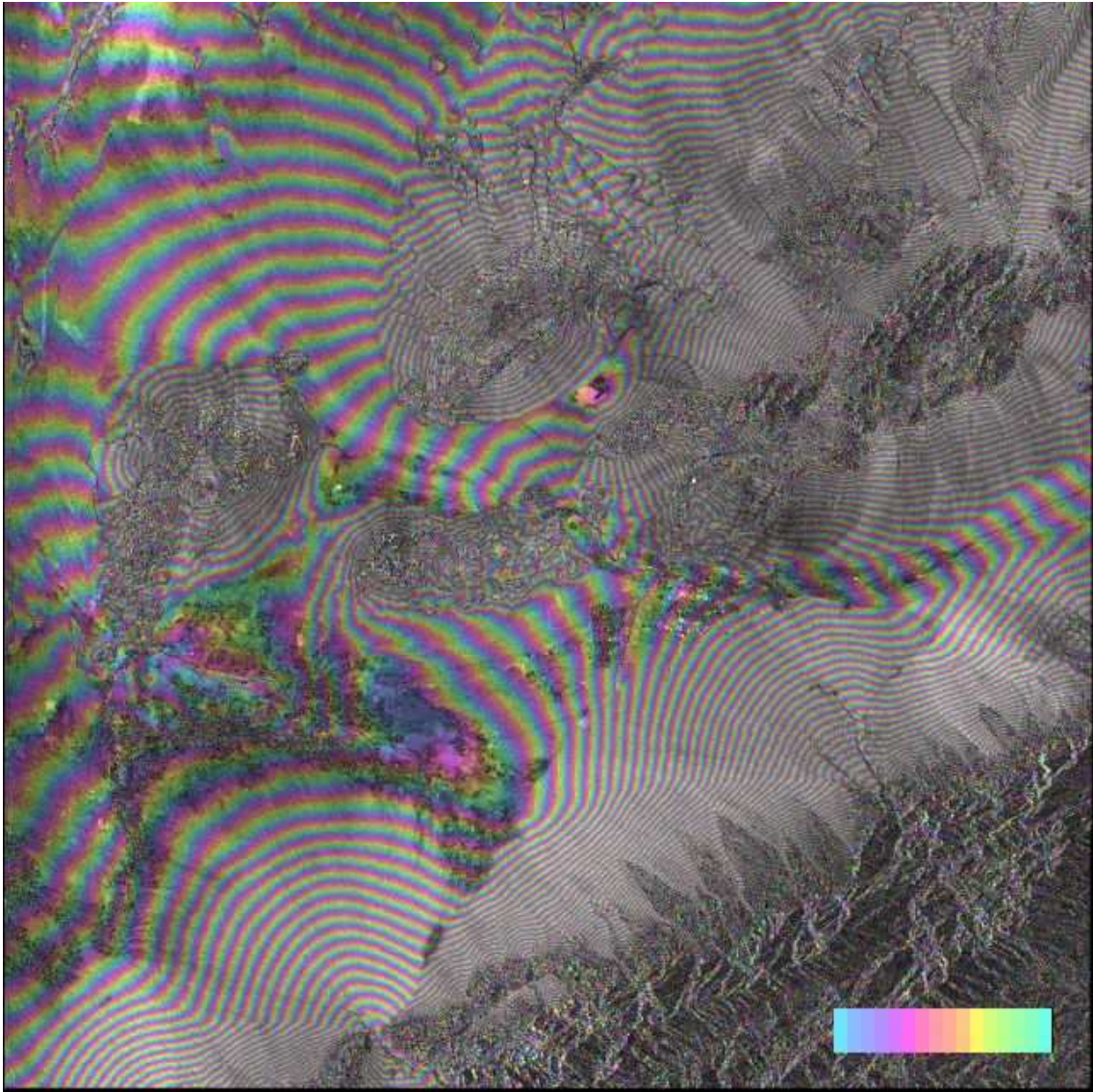


Figura 4.23: Dados ENVISAT, par topográfico – interferograma filtrado por média móvel (com 5 pixels de largura).

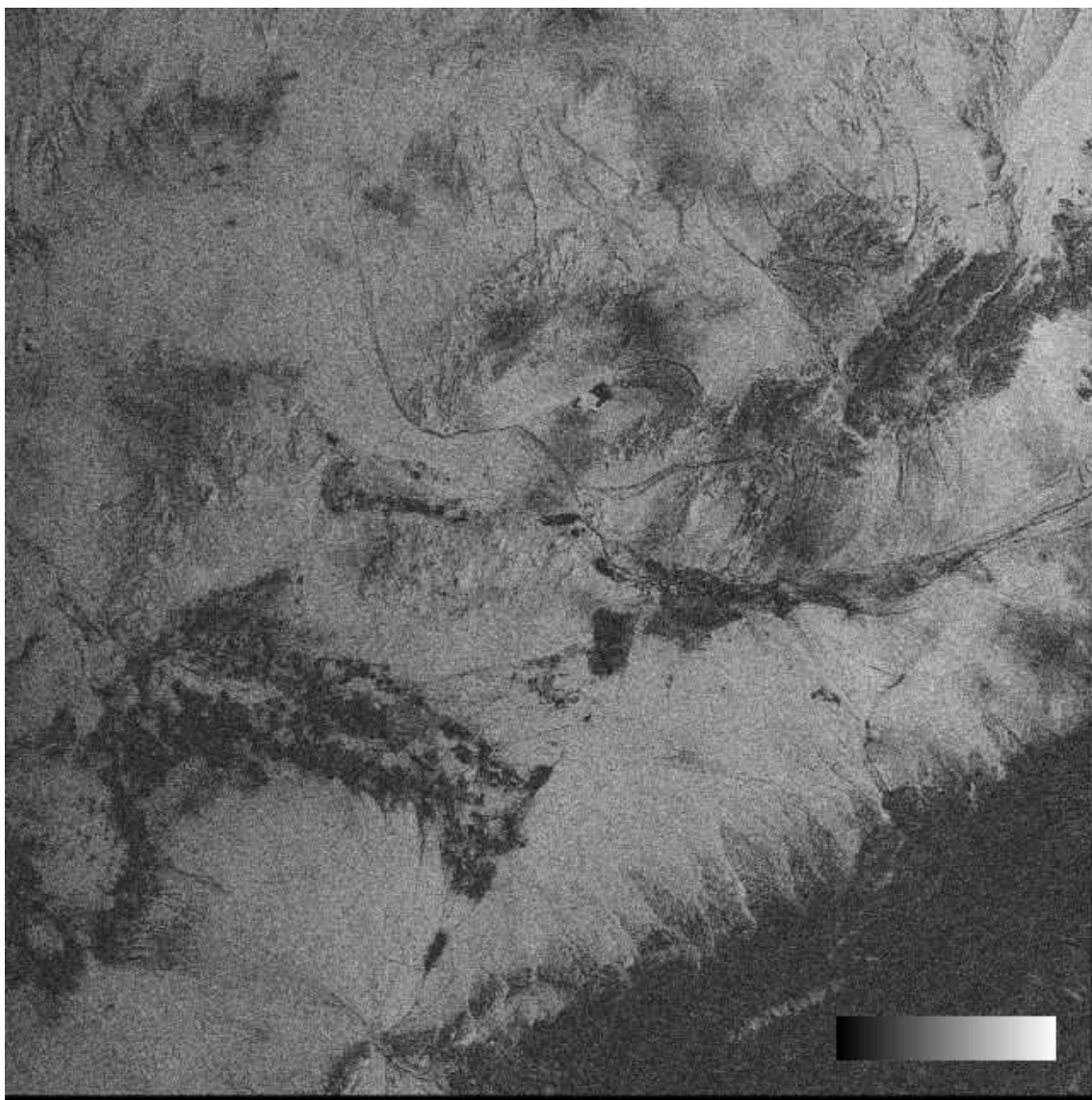


Figura 4.24: Dados ENVISAT, par topográfico – coerência.

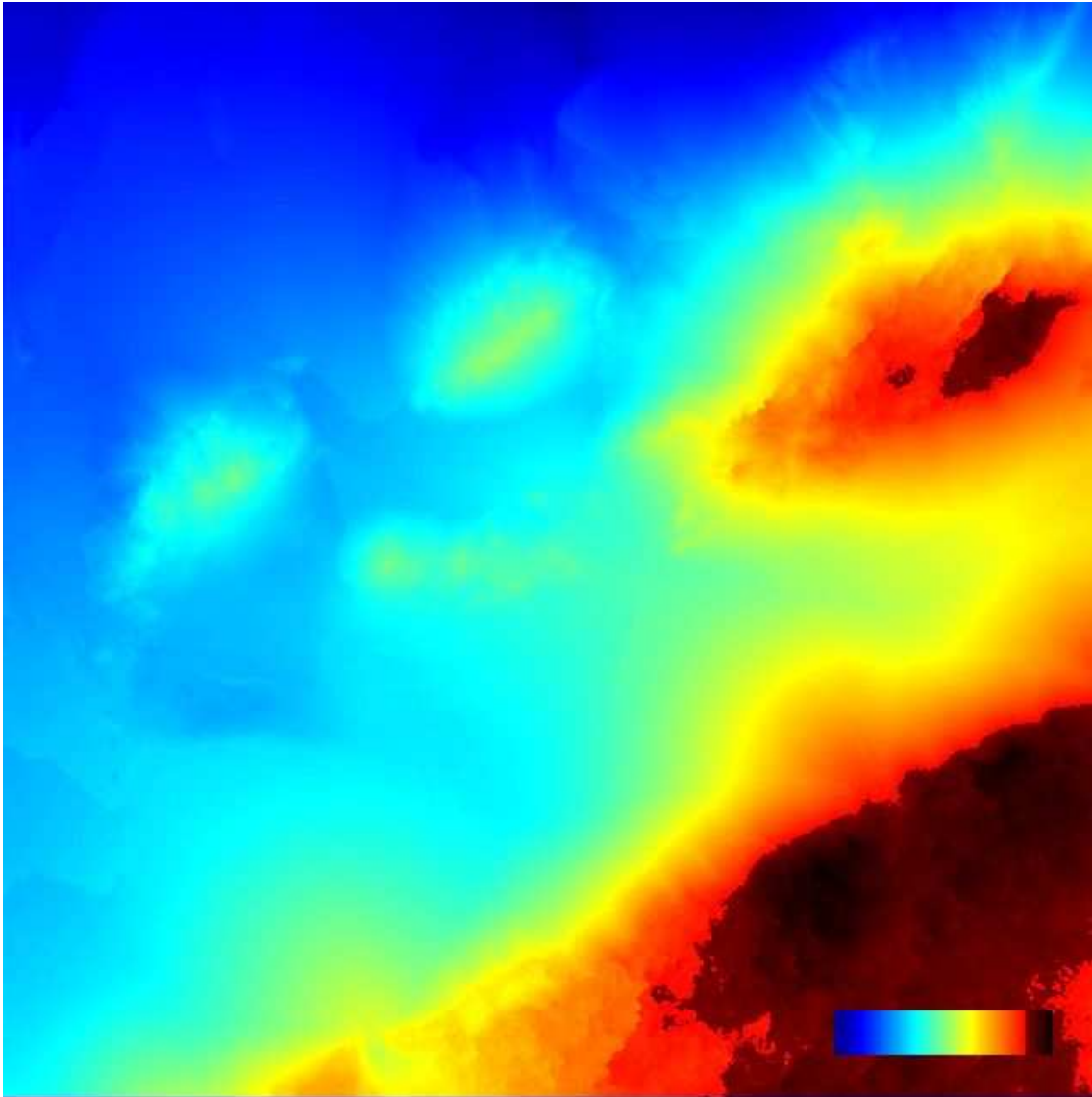
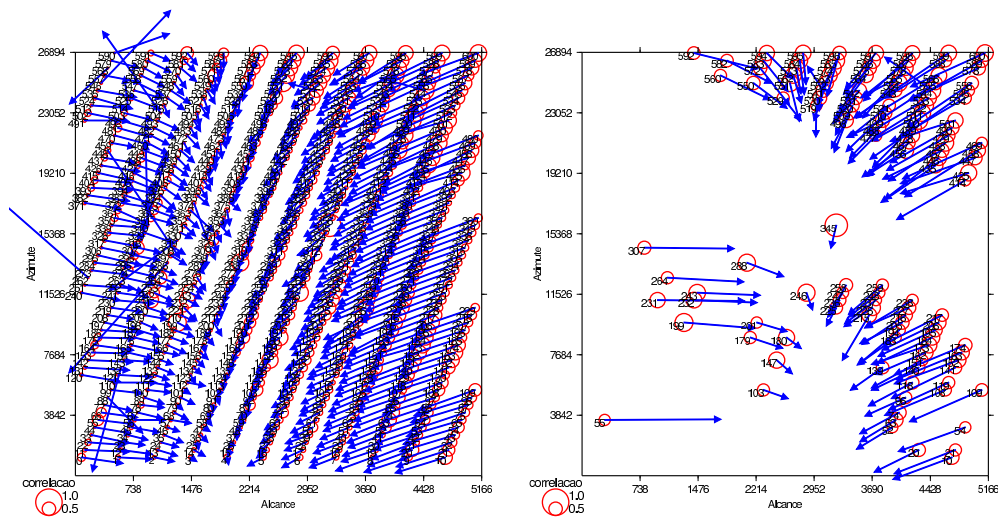


Figura 4.25: Datos ENVISAT, par topográfico – interferograma desenrolado.



(a) Amostragem fi na (todas as amostras; escala dos vetores em 1/2).

(b) Amostragem fi na (apenas amostras com coerência maior que 0,4; escala dos vetores em 1/1).

Figura 4.26: Dados ENVISAT, par de deformação – deslocamento entre imagens.

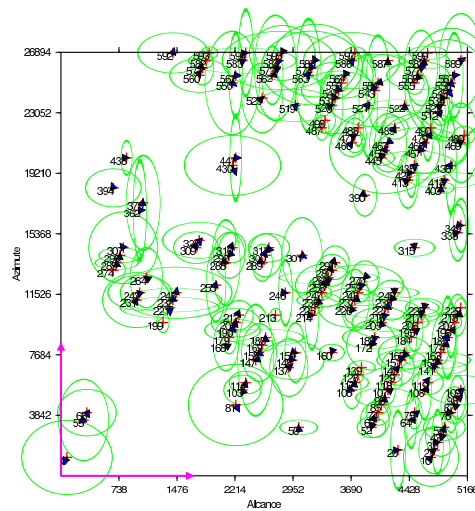


Figura 4.27: Dados ENVISAT, par de deformação – resíduos do ajustamento do polinômio de transformação entre imagens (apenas amostras com coerência maior que 0,4; escala dos vetores em 1/1).

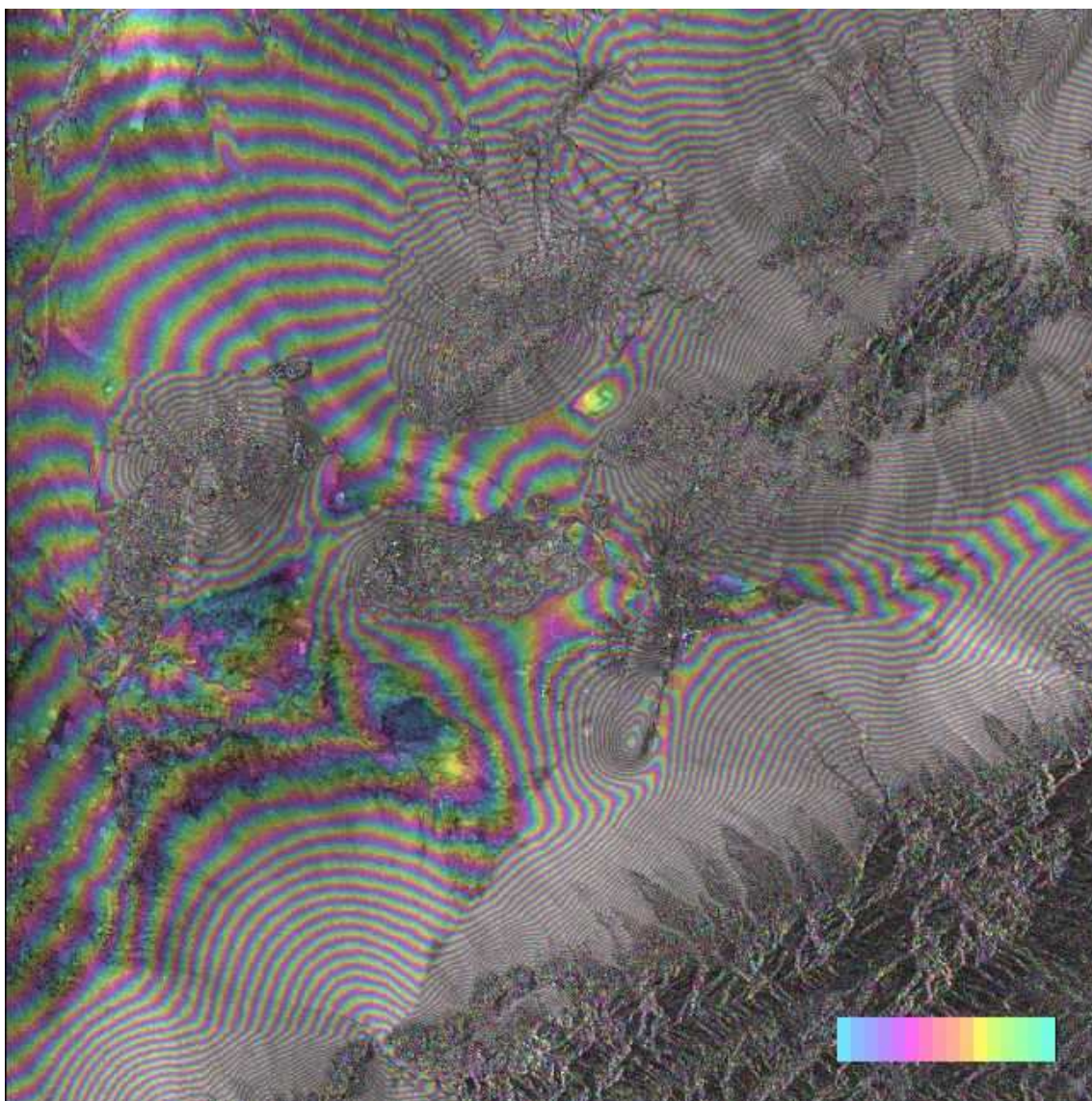


Figura 4.28: Dados ENVISAT, par de deformação – interferograma sem componente devida à forma elipsóidica da Terra e filtrado por média móvel (com 5 pixels de largura).

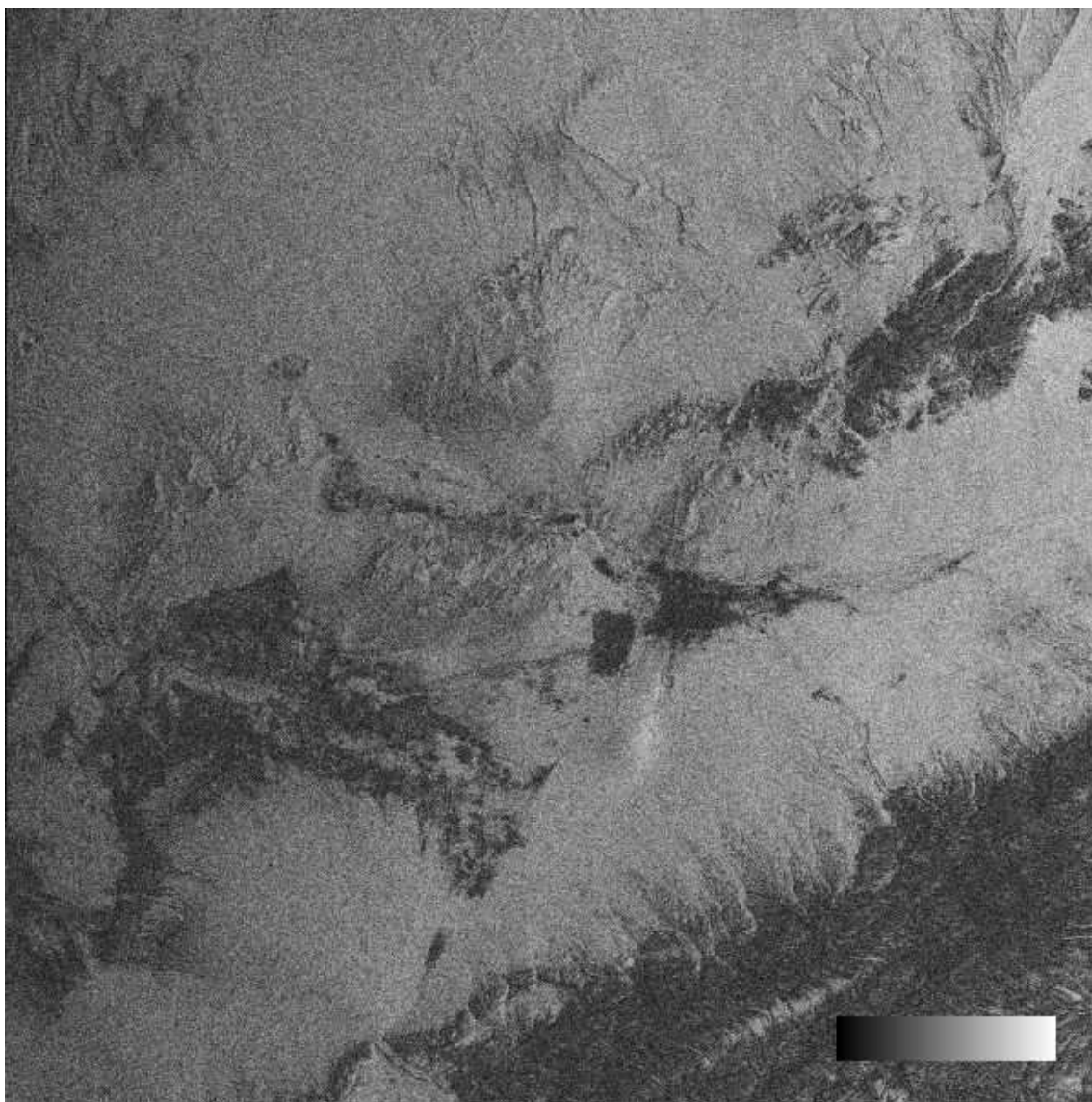


Figura 4.29: Dados ENVISAT, par de deformação – coerência.

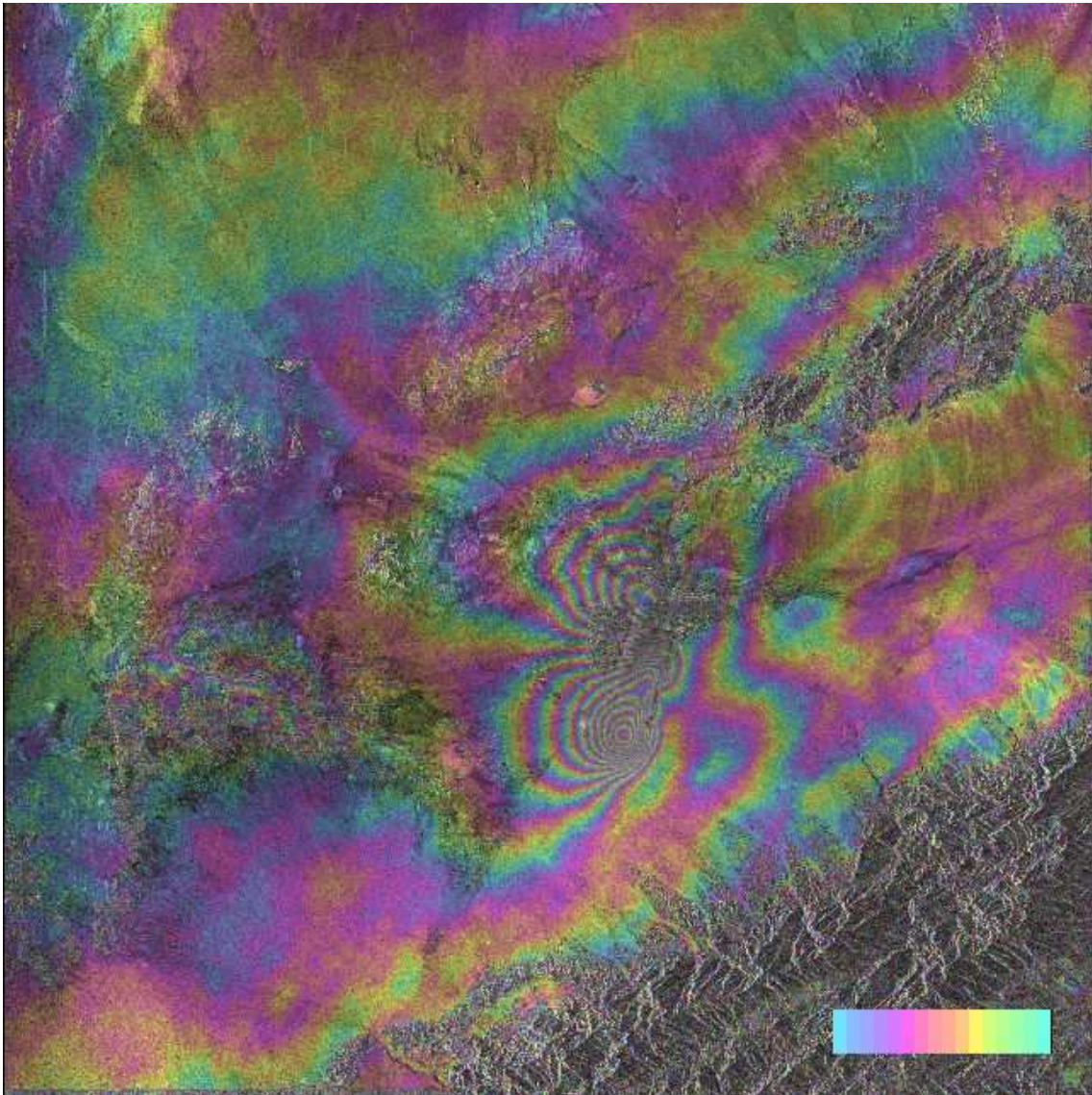


Figura 4.30: Datos ENVISAT: interferograma diferencial.

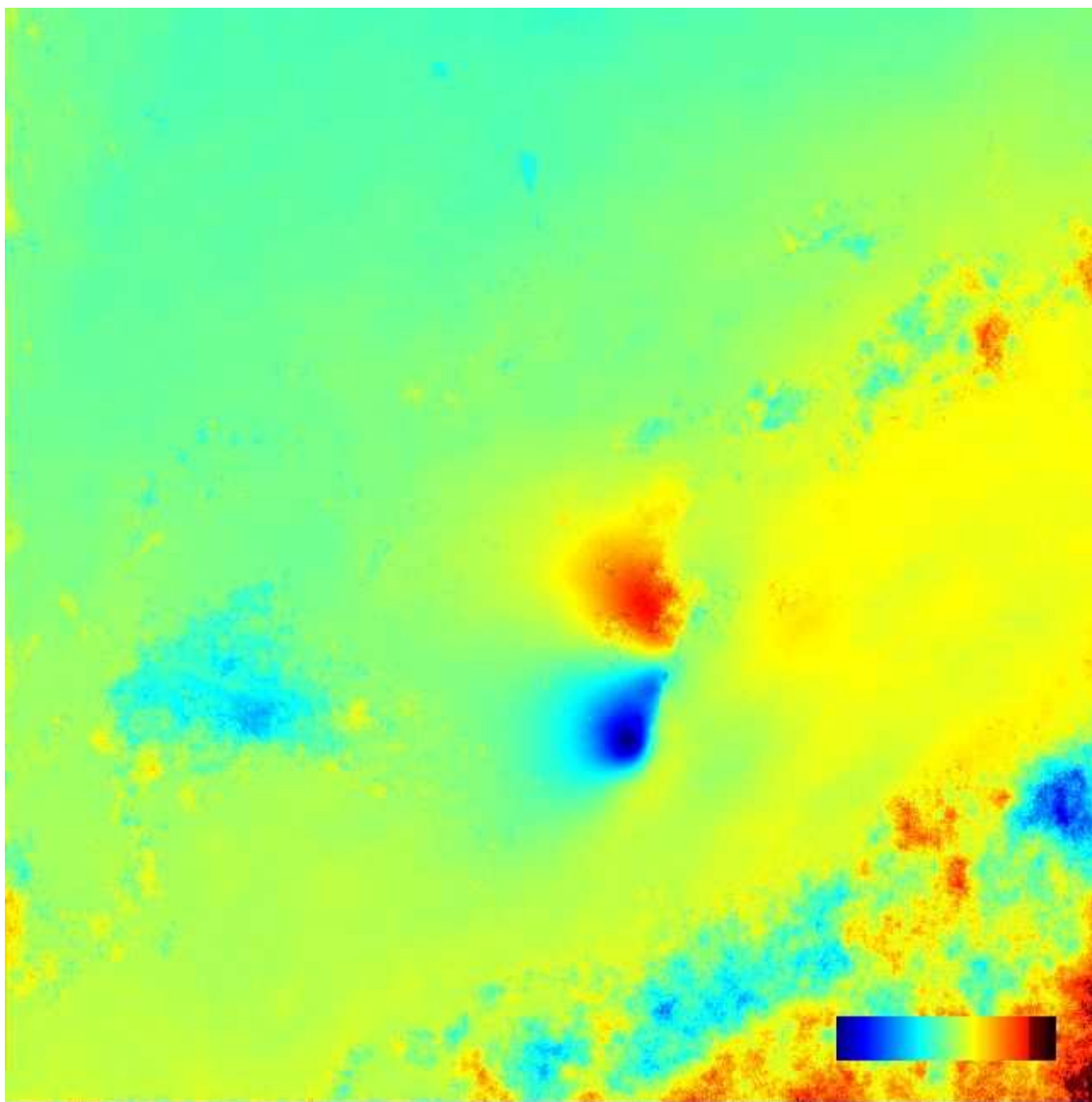


Figura 4.31: Datos ENVISAT: interferograma diferencial desenrolado.

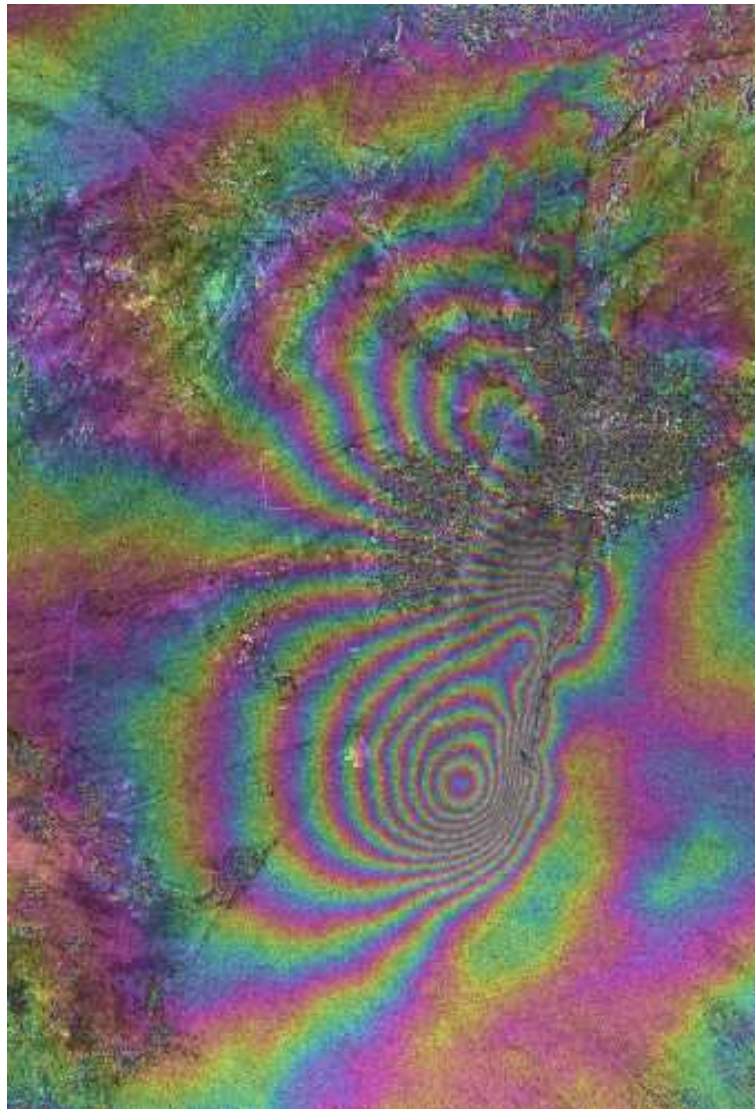


Figura 4.32: Dados ENVISAT: recorte do interferograma diferencial.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A técnica InSAR combina dados de um par de imagens de radar de abertura sintética para com isso obter observações suficientes para determinar a posição de alvos; incluindo uma terceira imagem ou um modelo digital de elevação conseguimos determinar também o deslocamento do alvo. Estes princípios são aplicados em massa através de um processo não trivial mas quase automático, que permite a geração de mapas de elevação e mapas de deformação com resolução de metros e extensão de quilômetros.

Entretanto, diversos fatores limitam o sucesso na aplicação da técnica InSAR. O mais severo deles é a decorrelação temporal, devida ao deslocamento não-coerente dos dispersores que compõem um alvo ou elemento de resolução, e que pode ser medida através da baixa coerência do interferograma. Outra limitação importante são os efeitos atmosféricos, que podem criar artefatos nos mapas de elevação ou deformação se não forem interpretados e isolados adequadamente.

As contribuições deste trabalho correspondem aos seus objetivos específicos (conforme seção 1.3): (i) uma revisão em português da literatura internacional sobre esta técnica ainda pouco explorada nacionalmente (seção 2); (ii) um modelo do processamento InSAR na forma de fluxograma (figura 2.14), utilizando uma notação gráfica (UML) que visa a facilitar o desenvolvimento de software; (iii) demonstração de resultados experimentais (seção 4) obtidos com programas e imagens disponibilizados gratuitamente, facilitando com isso a repetição dos experimentos e a introdução nesta técnica por pesquisadores interessados.

A principal conclusão deste trabalho é que a técnica de InSAR ainda precisa ser mais desenvolvida em instituições de pesquisa, antes que seu uso se torne comum na produção regular por empresas de mapeamento. Existem algumas empresas que utilizam rotineiramente InSAR, mas elas ainda são exceções e somam número muitas vezes menor que o número de empresas de mapeamento que utilizam imagens ópticas, p.ex. As contribuições dos pesquisadores para o uso rotineiro e generalizado de InSAR no futuro poderiam acontecer nos aspectos de (i) isolamento e redução dos fatores limitantes, (ii) automação das escolhas necessárias durante o processamento e (iii) divulgação e ensino da técnica.

As nossas sugestões específicas de trabalhos futuros são:

- buscar e processar no acervo da Agência Espacial Européia (ESA) dados dos satélites ERS/ENVISAT sobre regiões do Brasil e Antártica – os dados são oferecidos a preço de custo para pesquisadores;
- comparar os mapas de elevação gerados com imagens ERS ou ENVISAT com os

gerados pela missão SRTM;

- pesquisar formas de fornecer medidas da *incerteza* das medidas InSAR (HANSSEN, 2004b);
- pesquisar a integração de InSAR com GPS, com relação à componente atmosférica – tanto na remoção quanto no mapeamento de tal componente;
- detalhar e melhorar o fluxograma iniciado neste trabalho, usando a notação escolhida (UML) e revisando as referências consultadas;
- trabalhar com simuladores de imagens InSAR, para fins didáticos e para teste e comparação de algoritmos (WRAY; WILKINSON; INGG, 2000).

Acreditamos que as possibilidades de trabalhos futuros em InSAR são promissoras. Citando Hellwich (1999, p. 9), “...o [seu] vívido desenvolvimento continua sugerindo que InSAR vai permanecer como uma das áreas de pesquisa mais gratificantes em sensoriamento remoto”. Acreditamos que a disponibilidade de programas livres para processamento InSAR contribue significativamente para a popularização da técnica. De fato, foi a disponibilidade do programa DORIS pela Universidade Técnica de Delft que possibilitou a realização plena dos objetivos específicos deste trabalho. Acreditamos também que a disponibilidade de dados por missões orbitais otimizadas para InSAR (com tempos de revisita menores, p.ex.) terá um impacto também significativo. Especulamos que com a disponibilidade desses dois ingredientes essenciais, programas e dados, a geração e análise de mapas de elevação e de deformação com acurácia, respectivamente, métrica e centimétrica e resolução da ordem de dezenas de metros virarão rotina. Esperamos que este trabalho tenha contribuído nesta direção.

APÊNDICE A COMENTÁRIO SOBRE AS FONTES BIBLIOGRÁFICAS

Os textos utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram selecionados e escolhidos com base em dois tipos de fontes bibliográficas ou listas de referências.

As listas do primeiro tipo privilegiam a quantidade, visando a conter a maioria das referências, as vezes até milhares, sobre InSAR, como p.ex. as listas mantidas por Hanssen (2004a), Rueegg (2004), Alsdorf (2004), APD-ASF (2004) e Ramirez (2004).

Entretanto, justamente a grande extensão de tais listas inviabilizava o uso delas para *escolher* as referências que seriam realmente utilizadas neste trabalho. Para isto foram utilizadas listas de um segundo tipo, propositalmente menores, algumas até definindo uma ordem de prioridade para as referências que incluía. Tais listas visavam a apoiar a realização de um curso ou disciplina sobre InSAR, como p.ex. as criadas por especialistas em InSAR como Alsdorf e Luyendyk (2004) e Fialko e Sandwell (2004).

As listas do segundo tipo foram imprescindíveis para descobrir no início da pesquisa as referências fundamentais sobre InSAR. Em geral, foram buscadas referências de revisão sobre o assunto (como p.ex., Rosen et al. (2000), Bürgmann, Rosen e Fielding (2000), Massonnet e Feigl (1998)) e referências sobre os aspectos de processamento, focando na técnica em si e evitando ao máximo possível as diversas aplicações.

REFERÊNCIAS

ADVANCED PRODUCT DEVELOPMENT GROUP (APD), ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). *InSAR literature*. 2004. Internet. Disponível em: <<http://www.asf.alaska.edu/apd/documents%20-%20/>>.

AGER, T. P. Active sensing systems. In: MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, C. (Ed.). *Introduction to Modern Photogrammetry*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. cap. 11, p. 301–349.

ALSDORF, D. *Interferometry references*. 2004. Internet. Disponível em: <<http://www-icess.ucsb.edu/~alsdorf/intsarrefs.html>>.

ALSDORF, D.; LUYENDYK, B. *Interferometric Synthetic Aperture Radar Graduate Seminar*. 2004. Internet. Disponível em: <<http://www.icess.ucsb.edu/~alsdorf/gs270.html>>.

BAMLER, R. et al. SRTM and beyond: current situation and new developments in spaceborne InSAR. In: *ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, Hannover, Germany, 2003*. [s.n.], 2003. p. 7. Disponível em: <<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2003/workshop/bamler.pdf>>.

BÜRGMANN, R.; ROSEN, P. A.; FIELDING, E. J. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 28, p. 169–209, 2000.

CANADIAN CENTRE FOR REMOTE SENSING (CCRS). Remote sensing glossary. 2004. Disponível em: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary-glossary_e.html>.

CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. *Synthetic aperture radar: systems and signal processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991.

ELACHI, C. *Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.

FIALKO, Y.; SANDWELL, D. *Radar and Sonar Interferometry*: Sio 239. 2004. Internet. Disponível em: <<http://topex.ucsd.edu/insar/>>.

GENS, R. *Quality assessment of SAR interferometric data*. Tese (Doutorado) — Universität Hannover, 1998. ITC publication Nr.61.

- GENS, R.; GENDEREN, J. L. van. Review article: Sar interferometry—issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 10, p. 1803–1835, 1996.
- GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A.; WERNER, C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, v. 23, n. 4, p. 713–720, jul. 1988.
- GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, v. 62, n. 6, p. 763–768, jun. 1974.
- HANSSSEN, R. *Bibliography for SAR interferometry*. 2004. Internet. Disponível em: <<http://www.geo.tudelft.nl/fmr/research/insar/dig/bibliography/>>.
- HANSSSEN, R. Haphazard occurrences of reality: the link between opportunism, geodesy, and satellite radar interferometry. *Journal of Geodesy*, v. 77, n. 10-11, p. 686–688, 2004. Disponível em: <<http://www.gfy.ku.dk/~iag/HB2004/part3/33-bomford.pdf>>.
- HELLWICH, O. SAR interferometry: Principles, processing, and perspectives. In: HEIPKE, C.; MAYER, H. (Ed.). *Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag*. Technische Universität München, 1999. p. 109–120. Disponível em: <http://www.photo.verm.tu-muenchen.de/staff/olaf/heinrich_final.ps.gz>.
- HOEN, E. W. *A correlation-based approach to modeling interferometric radar observations of the Greenland ice sheet*. Tese (Doutorado) — Stanford University, 2001. Disponível em: <http://www.stanford.edu/group/radar/Weber_thesis.pdf>.
- KAMPES, B.; USAI, S. Doris: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software. In: *2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede, The Netherlands, 16–20 August, 1999*. [s.n.], 1999. Disponível em: <<http://www.geo.tudelft.nl/fmr/research/insar/sw/doris/Literature/itc99.ps.gz>>.
- KAMPES, B. M.; HANSSSEN, R. F.; PERSKI, Z. Radar interferometry with public domain tools. In: *Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE03', Frascati, Italy, 1–5 Dec 2003*. [s.n.], 2003. p. 10 pp. Disponível em: <http://enterprise.geo.tudelft.nl/doris/Literature/kampes_fringe03.pdf>.
- MASSONNET, D. *Etude de Principe d'une Détection de Mouvements Tectoniques par Radar*. [S.l.], 1985.
- MASSONNET, D. Satellite radar interferometry. *Scientific American*, p. 32–39, fev. 1997.
- MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, v. 36, n. 4, p. 441–500, nov. 1998.
- MASSONNET, D. et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, v. 364, n. 8, p. 138–142, jul.-8 1993.
- MURA, J. C. *Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR*. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <http://iris.sid.inpe.br:1905/col/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24/doc/pdf>.

MURA, J. C. *Princípios de mapeamento por radar de abertura sintética (SAR) no modo interferométrico*. 2003. Notas de aula.

RABUS, B. et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 57, p. 241–261, 2003.

RAMIREZ, E. *Interferometry bibliography*. 2004. Internet. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/interferometrybibliography.html>>.

ROCCA, F.; PRATI, C.; FERRETTI, A. An overview of sar interferometry. In: ESA. *Anais do terceiro simpósio ERS*. 1997. Disponível em: <<http://earth.esa.int/symposia/program-details/speeches/rocca-et-al/>>.

ROGERS, A. E.; INGALLS, R. P. Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry. *Science*, v. 165, n. 3895, p. 797–799, ago.-22 1969.

ROSEN, P. et al. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 3, p. 333–382, mar. 2000.

ROSEN, P. A. et al. Updated repeat orbit interferometry package released. *EOS Electronic Supplement*, v. 85, n. 5, fev.3 2004. Disponível em: <http://www.agu.org/eos_elec/000487e.html>.

RUEGG, M. *Along-Track Interferometric SAR and MTI SAR Literature*. 2004. Internet. Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/~mrueegg/RSL%20-%20SARLiterature/>>.

SANDWELL, D. T. SAR image formation: ERS SAR processor coded in Matlab. Lecture Notes - Radar and Sonar Interferometry. 2002. Disponível em: <http://topex.ucsd.edu/insar/sar_image_formation.pdf>.

SECOND INTERNATIONAL WORKSHOP ON ERS SAR INTERFEROMETRY (FRINGE99), 10 – 12 Nov 1999, Liège, Bélgica. *Anais...* Disponível em: <http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/fringe1999/>.

TALEBIAN, M. et al. The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault. *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. L11611, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2004GL020058>>.

THIRD INTERNATIONAL WORKSHOP ON ERS SAR INTERFEROMETRY (FRINGE03), 1–5 Dez 2003, Frascati, Itália. *Anais...* Disponível em: <<http://earth.esa.int/fringe03/>>.

WANG, R. et al. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry. *Geophysical Journal International*, 2004. (fast track paper). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02476.x>>.

WORKSHOP ON ERS SAR INTERFEROMETRY (FRINGE96), 30 Set – 2 Out 1996, Zurique, Suíça. *Anais...* Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/>>.

WRAY, L. S.; WILKINSON, A. J.; INGGS, M. R. Synthetic aperture radar image simulator for interferometry. In: *ISRSE, Cape Town, 27-31 March 2000*. [s.n.], 2000. Disponível em: <http://www.eng.uct.ac.za/~ajw/papers/isrse2000-/insarsim_ISRSE2000_submitted.pdf>.

ZEBKER, H. A. Studying the Earth with interferometric radar. *Computing in Science and Engineering*, v. 2, n. 3, p. 52–60, maio/jun. 2000.

ZEBKER, H. A.; GOLDSTEIN, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, v. 91, n. B5, p. 4993–4999, abr.-10 1986.

ZEBKER, H. A. et al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. B10, p. 19617–19634, out.-10 1994.

ZISK, S. H. A new earth-based radar technique for the measurement of lunar topography. *Moon*, v. 4, p. 296–306, 1972.