

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8209-TDI/764

**GEOCODIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS DE RADAR
DE ABERTURA SINTÉTICA INTERFEROMÉTRICO:
Sistema Geo-InSAR**

José Claudio Mura

Tese de Doutorado em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Antônio Miguel
Vieira Monteiro e João Roberto Moreira, aprovada em 28 de agosto de 2000.

INPE
São José dos Campos
2001

621.376.5

MURA, J. C.

Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: Sistema Geo-Insar / J.C. Mura. – São José dos Campos: INPE, 2000.
159p. - (INPE-8209-TDI/764).

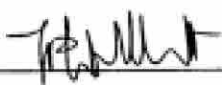
1.Interferometria. 2.Radar. 3.Imagem. 4.Radar de Abertura Sintética (SAR). 5.Geocodificação. 6.Retificação geométrica. I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Doutor** em **Computação Aplicada**.

Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro


Presidente/Orientador

Dr. João Roberto Moreira


Orientador

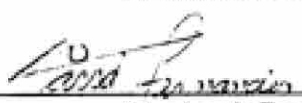
Dr. Luciano Vieira Dutra


Membro da Banca

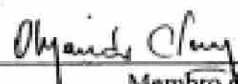
Dr^a. Leila Maria Garcia Fonseca


Membro da Banca

Dr. David Fernandes


Membro da Banca
Convidado

Dr. Alejandro César Frery Orgambide


Membro da Banca
Convidado

Candidato (a) : José Claudio Mura

São José dos Campos, 28 de agosto de 2000.

Dedico carinhosamente esta tese de Doutorado
a meus pais Abel (em memória) e Teresa (em memória),
a minha esposa Magda e minha filha Fabian

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro e Dr. João Roberto Moreira pela confiança, incentivo e orientação que me deram durante a realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao Dr. João Roberto Moreira, com quem iniciei meus trabalhos e pesquisas na área de processamento de imagens de radar e interferometria, durante minha estadia no DLR (Alemanha) no período de julho/1992 a maio/1993, e também em outros períodos menores nos anos de 1997, 1999 e 2000, na Empresa Aerosensing RadarSysteme (Alemanha).

Meu sincero agradecimento a todos os membros da Banca Examinadora, pelas valiosas sugestões na melhoria deste trabalho.

A todos os colegas do INPE, principalmente da Divisão de Processamento de Imagens, pela amizade, incentivo e excelente ambiente de trabalho. Em especial, agradeço ao Fábio Furlan pela sua amizade, pelo incentivo e por ter me suportado durante estes anos todos na mesma sala. Outro agradecimento especial ao Leonardo Bins pela amizade, pelo incentivo, pelas discussões e valiosas contribuições para este trabalho. Gostaria de agradecer também a Sueli, Paulo Gurgel, Lauro, Paulo Honda, Eugenio e Sergio, pela nossa amizade, incentivo e com quem tive o prazer de trabalhar juntos durante o Projeto São Francisco. A todos meus amigos que sempre me incentivaram.

Este trabalho só foi possível graças ao apoio, carinho, compreensão e paciência da minha esposa Magda e da minha filha Fabiana, a quem dedico esta tese.

Finalmente, gostaria de agradecer a Cooperação Brasil-Alemanha na área Científica e Tecnológica (6/09/1969), pelo suporte financeiro durante as minhas estadias na Alemanha.

RESUMO

O processo de geração de produtos cartográficos, a partir de imagens de Radar de Abertura Sintética Aerotransportado, “Synthetic Aperture Radar” (SAR), utilizando a técnica de Interferometria SAR (InSAR), pode ser dividido em duas partes. A primeira parte trata do *Processamento SAR Interferométrico*, onde é gerada a imagem SAR e o interferograma. A segunda parte trata da *Geocodificação InSAR*, onde é gerada a orto-imagem SAR e o Modelo Numérico de Terreno (MNT). A primeira parte é realizada no modo automático, e a segunda parte no modo semi-automático, pois a etapa de calibração de fase ainda requer certos cuidados do operador. A calibração de fase está relacionada à estimativa do “*offset*” de fase associado a cada interferograma. Este “*offset*” pode ser determinado através do uso de pontos de controle, refletores de canto, que é um meio caro e nem sempre disponível, ou através de métodos já existentes mas pouco eficientes computacionalmente. Esta tese apresenta a concepção, equacionamento, implementação e teste de um novo método para calibração de fase, que viabiliza a automatização do processo de *Geocodificação InSAR*. O novo método utiliza dois interferogramas, adquiridos em direções opostas de voo, com uma região de sobreposição entre eles. O método baseia-se na construção de funções que relacionam “*offset*” de fase com altitude, em um conjunto de pontos na região de sobreposição entre os dois interferogramas. Para cada ponto, relaciona-se a função de “*offset*” do primeiro, com a função de “*offset*” do segundo, através de um processo de interpolação. Este conjunto de novas funções apresentam pontos de cruzamentos, muito próximos um dos outros, de onde é possível estimar os valores dos “*offset*” de fase dos dois interferogramas. Resultados baseados em dados reais de mapeamento, utilizados no Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco, são apresentados, mostrando a viabilidade do processo automático de Geocodificação InSAR. O novo método de calibração de fase, mostrou-se robusto e cerca de 20 vezes mais rápido que o método equivalente conhecido, e o processo de Geocodificação InSAR cerca de 3 vezes mais rápido, quando se utilizou o novo método. O uso deste novo método mostra que é possível reduzir o número de pontos de controle, reduzir o tempo de processamento, e por consequência, reduzir os custos de um projeto de produção cartográfica baseado em radargrametria.

AUTOMATIC GEOCODING OF THE INTERFEROMETRIC SAR IMAGES:

Geo-InSAR System

ABSTRACT

The generation of high resolution topographic map from airborne InSAR data, involves two processing parts, the Interferometric SAR processing and the InSAR Geocoding. The first part can be done in the automatic mode, because the algorithms involved are efficient and well known. In the second part, the phase calibration is the critical processing step, and the algorithm that has been used to do that is not efficient. The aim of this thesis, is an efficient method to estimate the phase offset, in order to calibrate the interferometric phase, to make the automatic InSAR Geocoding feasible. The proposed method for phase calibration, uses a pair of overlapped interferograms acquired in opposite flight direction. Functions between phase offset and heights for both interferogram are built, in a set of points in the overlapped area. For each point, the offset function of the first interferogram can be interpolated with the corresponding offset function of the second interferogram. This operation can be done for a set of points. The intersection of these interpolated functions, or crossing points, gives the estimated phase offset for both interferograms. The performance of this method has been tested with airborne InSAR data, acquired during the São Francisco mission in Brazil, and comparison of the results using corner reflectors is presented. The proposed method for phase calibration is 20 times faster than the equivalent one, and presents the same results in terms of accuracy. Extensive experimental results are provided, in order to confirm the feasibility of the automatic InSAR Geocoding procedure, using the proposed method for phase calibration. The Digital Elevation Models generated from interferometric phases, calibrated by using control points and also by using the new method, are compared. The automatic InSAR Geocoding process is 3 times faster when the new method for phase calibration is used, instead of the equivalent one. The use of the proposed method for phase calibration, shows that it is possible to decrease the number of the corner reflector in a mapping process, decreasing the cost of this process.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 25

1.1	Motivação	25
1.2	Conceitos básicos de mapeamento por interferometria SAR	26
1.3	Contribuição da tese	29
1.4	Organização da tese	29

CAPÍTULO 2 INTERFEROMETRIA SAR (InSAR) 31

2.1	Princípios de imageamento SAR.....	31
2.1.1	Caracterização dos dados brutos SAR.....	33
2.1.2	Formação da Imagem SAR	35
2.2	Princípios da Interferometria SAR.....	37
2.2.1	Equacionamento InSAR básico	38
2.2.2	Registro e geração da fase interferométrica	40
2.2.3	Desdobramento da fase interferométrica	43
2.2.4	“Offset” de fase interferométrica	45
2.2.5	Imagem de coerência	46
2.3	Princípios da geocodificação de imagens SAR	48
2.3.1	Geocodificação de imagens SAR interferométricas	50

CAPÍTULO 3 CALIBRAÇÃO DE FASE INTERFEROMÉTRICA 53

3.1	Método utilizando ponto de controle	53
3.2	Método de minimização do erro global	55

3.3	O novo método proposto	57
3.3.1	Equacionamento do método	57
3.3.2	Algoritmo para a estimativa dos valores de “ <i>offset</i> ” de fase	61
3.3.3	Implementação do método	63
3.4	Teste comparativo entre os métodos	69
3.4.1	Análise de erros no MNT devido a erro no “ <i>offset</i> ” de fase	73
CAPÍTULO 4 GEOCODIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS InSAR ...		77
4.1	Geocodificação automática proposta.....	77
4.1.1	Calibração de fase	79
4.1.2	Geração de Modelo Numérico de Terreno.....	81
4.1.3	Geração de mapa de resolução	85
4.1.4	Geração de orto-imagem SAR	87
4.1.5	Mosaicagem de MNTs	89
4.1.6	Mosaicagem de orto-imagens SAR	89
4.1.7	Geração de curvas de nível	90
CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS		91
5.1	Resultados quantitativos	97
5.2	Análise dos resultados do mosaico.....	105
5.3	Análise dos resultados altimétrico nos pontos de controle.....	108
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES		111
6.1	Resumo e conclusões	111
6.2	Futuras pesquisas e desenvolvimentos	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		115

APÊNDICE A	DISTORÇÕES EM RADARES DE VISADA LATERAL..	123
APÊNDICE B	CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DO SINAL SAR ..	127
APÊNDICE C	FONTES DE ERROS EM SISTEMA InSAR	131
C.1	Erros de posicionamento	131
C.2	Erros na fase interferométrica	133
C.3	Caracterização estatística do ruído de fase.....	136
APÊNDICE D	INCLINAÇÃO LIMITE DE SUPERFÍCIE	139
APÊNDICE E	GEOCODIFICAÇÃO SAR INVERSA.....	141
APÊNDICE F	CONCEITO DE RESOLUÇÃO ESPACIAL LOCAL	145
APÊNDICE G	CORREÇÃO DE PADRÃO DE ANTENA	147
APÊNDICE H	ESTIMATIVA DO NÚMERO DE PONTOS PARA A GERAÇÃO DAS FUNÇÕES DE “OFFSET” DE FASE...	149
APÊNDICE I	DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE GEOCODIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS SAR INTERFEROMÉTRICAS	155
I.1	Calibração de fase interferométrica	156
I.2	Geração de Modelo Numérico de Terreno	156
I.3	Geração de Orto-Imagem SAR	157
I.4	Geração de Mapa de Resolução	157
I.5	Mosaicagem dos Modelos de Elevação	158
I.6	Mosaicagem das Orto-Imagens	158
I.7	Geração das Curvas de Nível	159

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 Processo de aquisição de dados em mapeamento sistemático InSAR	27
1.2 Ilustração do processo de geração de uma orto-imagem carta	28
2.1 Geometria de uma sistema SAR.....	31
2.2 Ilustração de pulsos transmitidos.....	31
2.3 Ilustração do intervalo da abertura sintética	32
2.4 Representação da “ <i>range migration</i> ” na matriz de dados SAR brutos.....	35
2.5 Modos de aquisição utilizados em Interferometria SAR.....	38
2.6 Geometria básica de um sistema Interferométrico SAR.....	39
2.7 Ilustração da obtenção do Interferograma	42
2.8 Ilustração do desdobramento da fase interferométrica	43
2.9 Ilustração de uma imagem de coerência	47
2.10 Representação geométrica do posicionamento de um ponto P	49
2.11 Representação geométrica do posicionamento de um ponto P, para aquisição de dados no modo interferométrico	51
3.1 Refletor de canto	53
3.2 Ponto de controle na imagem SAR	54
3.3 Aquisições em direções opostas	55
3.4 Ilustração do processo da estimativa dos “ <i>offset</i> ” de fase	56
3.5 Geometria de aquisição do método proposto	57
3.6 Seqüência de operações do método	63
3.7 Representação da família de funções de “ <i>offset</i> ” de fase, nas duas etapas	66
3.8 Transformação por Principais Componentes das funções de “ <i>offset</i> ” de fase ...	67
3.9 Ilustração da determinação da variância do grupo de funções rotacionadas	68
3.10 Tipos de áreas testadas: (a) plana, (b) mista, (c) acidentada	69
3.11 Geometria de aquisição das imagens de teste	74
3.12 Desvios nos valores do modelo de elevação	74
4.1 Fluxo de processamento para geração de orto-imagem carta	78
4.2 Fluxo de processamento para calibração de fase	80
4.3 Transformações Cartográficas	82

4.4	Representações do geóide e de elipsóides	83
4.5	Ilustração de altura elipsoidal e altura geoidal	84
4.6	Ilustração de um MNT geo-referenciado, obtido por Interferometria SAR	85
4.7	Ilustração de ângulo de incidência local	86
4.8	Ilustração de um mapa de resolução.....	87
4.9	Ilustração de uma orto-imagem SAR geo-referenciada	88
4.10	Ilustração de uma orto-imagem carta	90
5.1	Área de teste	92
5.2	Ilustração da Orto-imagem SAR (a) e do MNT (b) da carta 2_4 da área teste.	93
5.3	Exemplo de carta hipsométrica (a) e orto-imagem com curvas de nível (b) ...	94
5.4	Mosaico de orto-imagens SAR da área teste	95
5.5	Mosaico de Modelos de Elevação da área teste	96
5.6	Diferença entre os MNTs nas áreas de sobreposição entre as cartas.....	99
5.7	Diferença entre os MNTs na faixa entre 1 a 2 metros.....	100
5.8	Diferença entre os MNTs nas áreas de sobreposição entre as cartas – Método de Minimização de Função.....	103
5.9	Diferença entre os MNTs na faixa entre 1 a 2 metros, utilizando o método de Minimização de Função	104
A.1	Ilustração do processo de amostragem dos dados de imagem	123
A.2	Ilustração do conceito de imagem inclinada	123
A.3	Ilustração do encurtamento e alongamento de rampa	124
A.4	Ilustração do efeito de inversão	125
A.5	Ilustração do efeito de sombra	125
B.1	Ilustração de uma célula de resolução e o “ <i>backscatter</i> ” resultante	127
C.1	Distribuição da função densidade de probabilidade da fase, para diferentes valores do módulo do coeficiente de correlação complexo.....	137
D.1	Componentes vertical, horizontal e normal da linha-base.....	139
E.1	Ilustração do processo de geocodificação inversa	141
E.2	Representação dos vetores de posição e velocidade do sensor e do ponto P analisado.....	142
F.1	Ilustração de resolução espacial local	145
G.1	Variação do “ <i>range</i> ” para aeronave e satélite.....	147

H.1	Imagens de coerência das duas aquisições utilizadas na simulação	149
H.2	Valores de “ <i>offset</i> ” de fase da primeira aquisição.....	151
H.3	Valores de “ <i>offset</i> ” de fase da segunda aquisição	151
H.4	Ilustração do desvio padrão dos “ <i>offset</i> ” de fase em relação ao número de pontos utilizados	152
H.5	Ilustração dos tempos de processamento efetivo das funções.....	152
I.1	Diagrama geral do sistema Geo-InSAR	155

LISTA DE TABELAS

	Pág.
3.1 Tabela comparativa dos resultados de “ <i>offset</i> ” de fase	70
3.2 Diferença de “ <i>offset</i> ” de fase entre os métodos	71
3.3 Cálculo dos “ <i>offset</i> ” de fase com diferentes graus de sobreposição	72
3.4 Erro quadrático médio no modelo de elevação	75
5.1 Tempos médios de processamento das várias etapas do processo automático de geocodificação InSAR, do primeiro experimento	98
5.2 Tempos médios de processamento das várias etapas do processo automático de geocodificação InSAR, do segundo experimento	102
5.3 Comparação dos tempos de processamento entre os dois experimentos	105
5.4 Diferenças altimétricas nas áreas de sobreposição entre os MNTs	106
5.5 Valores altimétricos nos pontos de controle.....	109
5.6 Diferença altimétrica entre GPS e os MNTs, nos pontos de controle	110
5.7 Diferenças quadrática média entre MNTco e MNTnm	110
B.1 Distribuição para imagens de amplitude	130
H.1 Resultados da simulação.....	150

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{prf}	- Período de repetição de pulsos do radar	
T_p	- Tempo de um pulso do radar	
λ_f	- Comprimento de onda do sinal transmitido	
V	- Velocidade da plataforma	
θ	- Ângulo de incidência	
H	- Altitude do sensor (antena)	
ρ_{sr}	- Resolução em “ <i>slant range</i> ”	
ρ_{gr}	- Resolução em “ <i>ground range</i> ”	
t_e	- Tempo de início de iluminação do intervalo da Abertura Sintética	
t_s	- Tempo final de iluminação do intervalo da Abertura Sintética	
B_p	- Largura de banda do pulso de microonda	
B_D	- Largura de banda devido a variação de frequência Doppler	
σ_{rep}	- Densidade de refletividade complexa de um alvo pontual	
σ_{remap}	- Mapa de densidade de refletividade complexa da área iluminada	
Δ_{rm}	- Migração do “ <i>range</i> ”	
Δr	- Variação da distância inclinada, “ <i>slant range</i> ”	
ϕ_1	- Fase do pixel complexo da imagem	1
ϕ_2	- Fase do pixel complexo da imagem	2
$\Delta\phi$	- Fase interferométrica ou interferograma	
$\Delta\phi_p$	- Fase interferométrica pontual	
$\Delta\phi_u$	- Fase interferométrica desdobrada	
$\Delta\phi_{abs}$	- Fase interferométrica absoluta	
ϕ_{off}	- “ <i>Offset</i> ” da fase interferométrica	
$\hat{\phi}_{off}$	- Valor estimado do “ <i>offset</i> ” da fase	

$\hat{\phi}_{R\ off}$	- Valor estimado do “ <i>offset</i> ” da fase rotacionado
α	- Ângulo de inclinação da linha-base em relação ao horizonte
α^+	- Ângulo inclinação do terreno na mesma direção do sensor
α^-	- Ângulo inclinação do terreno na direção contrária do sensor
B	- Linha-base
B_h	- Componente horizontal da linha-base
B_v	- Componente vertical da linha-base
B_n	- Componente normal da linha-base
B_c	- Linha-base crítica
β_s	- Inclinação limite da superfície
S_a	- Espaçamento entre pixel
γ	- Coeficiente de correlação complexo entre as imagens interferométricas
$ \gamma $	- Fator de coerência entre as imagens interferométricas
f_D	- Frequência de desvio Doppler
$\vec{s}$	- Vetor posição do sensor
r	- Vetor distância entre o sensor e um ponto genérico no solo
p	- Vetor posição de um ponto genérico no solo
v_s	- Vetor velocidade do sensor
v_p	- Vetor velocidade de um ponto genérico no solo em relação ao sensor
p_x	- Coordenada x de um ponto genérico no solo no sistema cartesiano
p_y	- Coordenada y de um ponto genérico no solo no sistema cartesiano
p_z	- Coordenada z de um ponto genérico no solo no sistema cartesiano
h_e	- Altura elipsoidal
h_{el}	- Altura elipsoidal local
O_g	- Ondulação geoidal
h_{map}	- Altura no MNT

ε_{MNT}	- Erro quadrático médio entre MNT
K_{θ}	- Relação entre os ângulos de incidência
δ_h	- Intervalo altimétrico utilizado na construção das funções de “offset” de fase
ρ_h	- Resolução altimétrica do Modelo de Elevação
N_p	- Número de passos para a construção das funções de “offset” de fase
$h_{\min}$	- Altitude mínima utilizada na construção das funções de “offset” de fase
$h_{\max}$	- Altitude máxima utilizada na construção das funções de “offset” de fase
λ	- Longitude
φ	- Latitude
T_a	- Período de amostragem dos sinal de retorno do radar
θ_e	- Ângulo de incidência efetivo
$\langle \cdot \rangle$	- Valor esperado
U_k	- Retorno complexo de um elemento difusor
X_k	- Parte real do retorno de um elemento difusor
Y_k	- Parte imaginária do retorno de um elemento difusor
α_k	- Amplitude do sinal de retorno de um elemento difusor
$p_G(\dots)$	- Densidade de probabilidade Gaussiana bivariada
$\Gamma(\cdot)$	- Função Gamma
$\Gamma^{\frac{1}{2}}$	- Distribuição Raiz Quadrada da Gamma
$\mathfrak{R}$	- Distribuição de Rayleigh
$\mathcal{K}_A$	- Distribuição $\mathcal{K}$ para amplitude
$\kappa_{\nu}(\cdot)$	- Função de Bessel modificada
N	- Modelo do ruído “speckle”
S	- Modelo da reflectância do terreno
U	- Evento de variável aleatória definida pelo produto S . N .
k_p	- Parâmetro estatístico relativo ao alvo imageado

α_p	- Parâmetro estatístico relativo ao alvo imageado
λ_p	- Parâmetro estatístico relativo ao alvo imageado
σ_φ^2	- Variância do ruído de fase
φ_0	- Valor médio do ruído de fase
σ_r	- Desvio padrão da distância inclinada
σ_z^r	- Desvio padrão na elevação devido a variação da distância inclinada
σ_H	- Desvio padrão da altura da plataforma
σ_z^H	- Desvio padrão na elevação devido a variação da altitude da plataforma
σ_{B_z}	- Desvio padrão da componente vertical da linha-base
σ_{B_y}	- Desvio padrão da componente horizontal da linha-base
$\sigma_z^{B_z}$	- Desvio padrão na elevação devido a componente vertical da linha-base
$\sigma_z^{B_y}$	- Desvio padrão na elevação devido a componente horizontal da linha-base
σ_θ	- Desvio padrão do ângulo de incidência
σ_z^θ	- Desvio padrão na elevação devido a variação do ângulo de incidência
σ_ϕ	- Desvio padrão da fase
σ_z^ϕ	- Desvio padrão na elevação devido a incerteza na fase
γ_{term}	- Coeficiente de correlação entre as imagens devido ao ruído térmico
γ_B	- Coeficiente de correlação entre as imagens devido a linha-base
γ_t	- Coeficiente de correlação entre as imagens devido ao intervalo entre as aquisições
γ_p	- Coeficiente de correlação entre as imagens devido a erros de processamento
σ_{my}^2	- Variância do movimento da vegetação na direção horizontal
σ_{mz}^2	- Variância do movimento da vegetação na direção vertical
ε_p	- Erros de processamento

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A crescente necessidade de atualização e construção de bases espaciais digitais de qualidade cartográfica, para diversas aplicações em diversas escalas de análise, desde problemas de engenharia a problemas ambientais, de dimensões nacionais, tem fomentado o aparecimento de soluções tecnológicas que possam atender estas demandas, tanto em custo como em qualidade.

No Brasil, particularmente, a aerofotogrametria tem sido a principal tecnologia utilizada para produzir cartas topográficas com qualidade cartográfica adequada. O uso desta tecnologia depende de boas condições de vôo sem cobertura de nuvens, luz do dia, pontos de controle, e ainda hoje no Brasil, requer substancial operação manual, mesmo quando assistida por computador. Estas características podem gerar incertezas no planejamento de um projeto de mapeamento, encarecendo o produto cartográfico final.

A aeroradargrametria (Curlander et al., 1991) utilizando a técnica de Interferometria de imagens de Radar de Abertura Sintética, “Synthetic Aperture Radar” (SAR), Aerotransportado (Graham, 1974), é uma nova tecnologia para a geração de produtos cartográficos. Uma das vantagens do uso desta tecnologia, é a estimativa mais precisa do tempo de execução de um projeto de mapeamento, devido a previsibilidade da aquisição dos dados, mesmo com cobertura de nuvens ou na ausência da luz do dia, e a possibilidade da geração automática de produtos cartográficos, como a orto-imagem SAR e o Modelo Numérico de Terreno (MNT).

O processo de geração de produtos cartográficos, utilizando a técnica de Interferometria SAR (InSAR), pode ser dividido em duas partes. A primeira parte trata do *Processamento SAR Interferométrico*, onde é gerada a imagem SAR interferométrica e o interferograma (dados de fase da imagem SAR interferométrica). A segunda parte trata da *Geocodificação InSAR*, onde é gerada a orto-imagem SAR e o Modelo

Numérico de Terreno. A primeira parte é realizada no modo automático, pois os algoritmos envolvidos já são bem conhecidos e eficientes. A segunda parte no modo semi-automático, pois a etapa de calibração de fase ainda requer certos cuidados do operador. A calibração de fase está relacionada à estimativa do “*offset*” de fase associado a cada interferograma. Este “*offset*” pode ser determinado através do uso de pontos de controle, que é um meio caro e nem sempre disponível, ou através de métodos já existentes (Pasquali e Holecz, 1998) mas pouco eficientes computacionalmente.

A motivação deste trabalho foi a automatização do processo de Geocodificação InSAR, para que o processo de geração de produtos cartográficos fosse automatizado como um todo. Para isto necessitava-se de um método de calibração de fase automático, rápido, robusto e eficiente, que vem de encontro ao novo método proposto nesta tese.

1.2 Conceitos Básicos de Mapeamento por Interferometria SAR

A técnica de Interferometria SAR aerotransportada, de uma passagem, consiste da aquisição simultânea de duas imagens, através de duas antenas instaladas em uma aeronave, separadas de uma distância conhecida como linha-base. As duas imagens adquiridas no processo radargramétrico, são caracterizadas pela representação no formato complexo, ou seja, cada elemento de imagem, pixel, possui uma amplitude e uma fase. A diferença de fase entre pixels de duas imagens, formam a diferença de fase interferométrica, também conhecida como interferograma. A diferença de fase de cada par de pixels está relacionada com a altitude média do solo, na área do pixel.

A qualidade dos produtos cartográficos gerados através da técnica de Interferometria de imagens SAR aerotransportadas, depende da precisa compensação de movimento da plataforma, e do exato geo-referenciamento das imagens, conseguido através do uso de sistema de navegação de última geração, “Inertial Navigation System” (INS), e de GPS diferencial, “Differential Global Positioning System” (DGPS), (Barmetler et al., 1998).

A Figura 1.1 ilustra o processo de aquisição dos dados de imagens e de navegação, normalmente utilizados em mapeamento sistemático por Interferometria SAR.

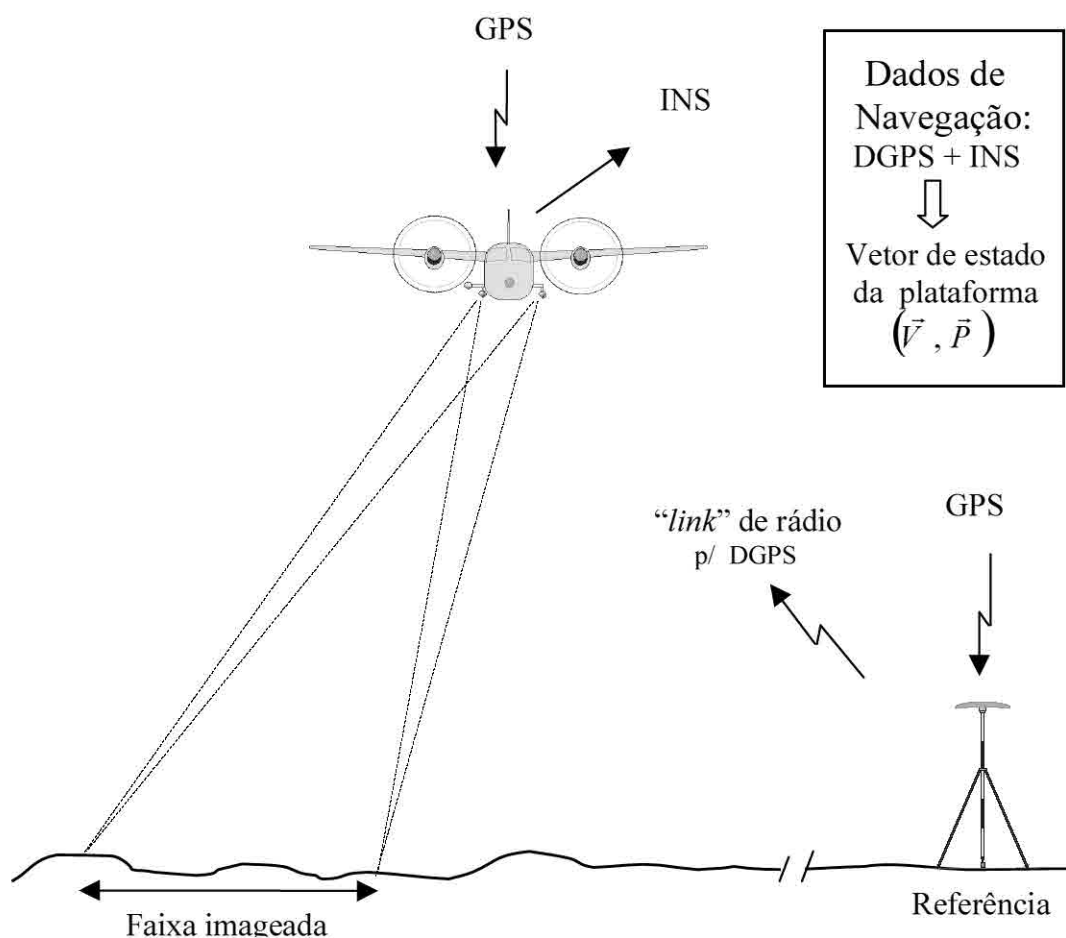


Fig. 1.1 – Processo de aquisição de dados em mapeamento sistemático InSAR

O processo de geração de produtos cartográficos, utilizando a técnica de Interferometria SAR (InSAR), passa por várias etapas de processamento, a geração de imagem SAR, o registro de imagens SAR, a geração do interferograma, o desdobramento de fase do interferograma, a calibração de fase, a geração da fase interferométrica absoluta, a geração de orto-imagem SAR, a geração de MNT, a mosaicagem de orto-imagens SAR e de MNTs, e a geração das curvas de nível. As 4 primeiras etapas podem ser chamadas de *Processamento SAR Interferométrico*, as demais podem ser chamadas de *Geocodificação InSAR*. O produto final gerado, normalmente, é uma a orto-imagem SAR e um Modelo Numérico de Terreno. A Figura 1.2 ilustra as etapas de processamento para a geração de uma orto-imagem carta, representada por um mosaico de orto-imagens SAR, com as curvas de nível extraídas do mosaico de MNTs.

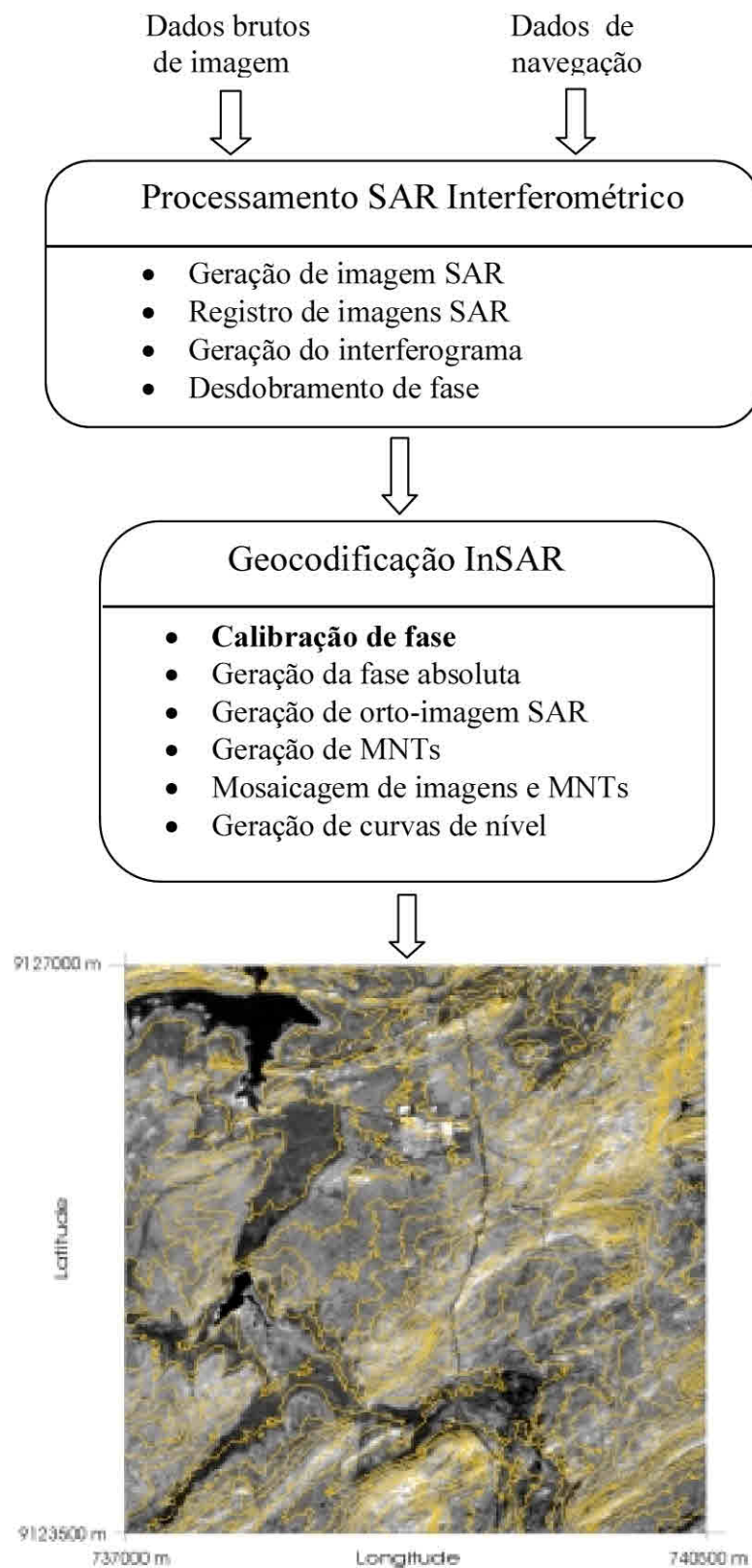


Fig. 1.2 – Ilustração do processo de geração de uma orto-imagem carta.

1.3 Contribuição da Tese

A maior contribuição desta tese é a concepção, equacionamento, implementação e teste de um novo método para calibração de fase, que viabiliza a automatização do processo de *Geocodificação InSAR*. O algoritmo proposto possui a mesma exatidão, em termos de valor de “*offset*” de fase, que o método equivalente conhecido (Pasquali e Holecz, 1998), baseado em minimização de função de erro, mas é mais eficiente computacionalmente.

A utilização deste novo algoritmo, viabilizou o desenvolvimento de um processo automático para a geração dos produtos cartográficos aeroradargramétricos, utilizando a técnica de Interferometria SAR. O algoritmo é robusto e cerca de 20 vezes mais rápido que o método equivalente conhecido, e o processo de Geocodificação InSAR cerca de 3 vezes mais rápido, quando se utilizou o novo método.

O uso deste novo método de calibração de fase, mostrou que é possível reduzir o número de pontos de controle, reduzir o tempo de processamento, e por consequência, reduzir os custos de um projeto de produção cartográfica baseado em aeroradargrametria.

1.4 Organização da Tese

Este trabalho de tese está organizado como segue. O Capítulo 2 apresenta de forma resumida os princípios da metodologia de mapeamento utilizando aeroradargrametria e a técnica de Interferometria SAR, bem como os diversos algoritmos propostos na literatura, para a resolução dos problemas envolvidos nas várias etapas do processamento.

No Capítulo 3 são apresentados os métodos existentes para calibração de fase interferométrica, bem como o novo método que é a contribuição desta tese, que possibilita a implementação do processo automático de Geocodificação InSAR. O novo método proposto para calibração de fase, é descrito em detalhes e seu desempenho avaliado em relação aos métodos existentes.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia do processo automático de Geocodificação InSAR, para a geração de orto-imagem carta, a partir de dados interferométricos, utilizando o novo método de calibração de fase desenvolvido.

Tendo em vista que uma orto-imagem carta é composta por várias imagens, e consequentemente por vários interferogramas, a etapa de calibração das fase é gerenciada, para que seja utilizado o método mais apropriado na determinação dos “*offsets*” de fase, na seguinte ordem: utiliza-se *pontos de controle* quando houver, utiliza-se o *novo método proposto*, e em terceira prioridade, o *método baseado no uso de áreas vizinhas geocodificadas e sobrepostas*.

No Capítulo 5 são geradas várias orto-imagens cartas, na escala de 1:5000, utilizando o processo automático de Geocodificação InSAR, para a verificação da performance do novo método de calibração de fase, e também do desempenho do processo automático, para dados Aerotransportado.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

INTERFEROMETRIA SAR (InSAR)

2.1 Princípios de Imageamento SAR

O Radar de Abertura Sintética, SAR, é um sistema imageador ativo de visada lateral, que trabalha com sinais de rádio na faixa de microondas (Jensen et al, 1977). O princípio básico de imageamento SAR, consiste de um radar instalado em uma plataforma aerotransportada ou orbital, como mostra a Figura 2.1. A medida que a plataforma se desloca na velocidade V , o transmissor envia pulsos de microondas modulados linearmente em frequência, conhecidos como “*chirp*” (Wehner, 1987), em intervalos regulares, T_{prf} , como ilustrado na Figura 2.2. Normalmente se convencionou a direção de voo como a direção de azimuth e a direção perpendicular ao voo, como a direção de “*range*”, ou radial.

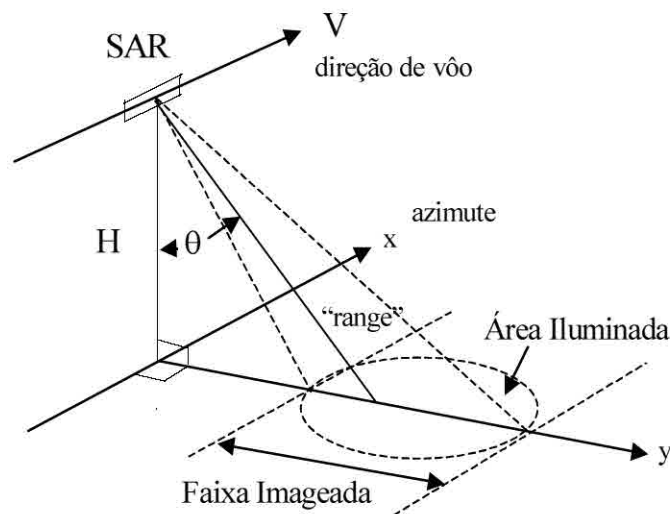


Fig. 2.1 - Geometria de um sistema SAR.

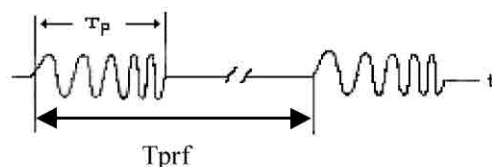


Fig. 2.2 – Ilustração de pulsos transmitidos.

Os sinais que retornam ao receptor do radar, são gravados a bordo, e posteriormente processados para a geração da Imagem SAR. A variação de frequência do pulso transmitido define a largura de banda do pulso, B_p . A alta resolução da Imagem SAR na direção radial, é conseguida através do uso de pulso com alta largura de banda, esta resolução é definida por:

$$\rho_{sr} = c / (2.B_p) \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz.

A alta resolução da Imagem SAR na direção de azimuth, é conseguida através da técnica conhecida por Abertura Sintética. Para entender melhor o que ocorre em um sistema de imageamento SAR, utiliza-se como modelo o comportamento de um alvo pontual. A Figura 2.3 mostra o imageamento de um ponto genérico P , desde a sua entrada no campo visual da antena, no instante azimuthal τ_e , até sua saída no instante τ_s . No intervalo de tempo $(\tau_s - \tau_e)$ o radar envia um certo número N de pulsos, dessa maneira, coleta-se N amostras do eco do ponto P neste intervalo. Durante o intervalo de tempo $(\tau_s - \tau_e)$ a plataforma se desloca $V.(\tau_s - \tau_e)$ metros, este deslocamento é conhecido como o comprimento da ‘Abertura Sintética’.

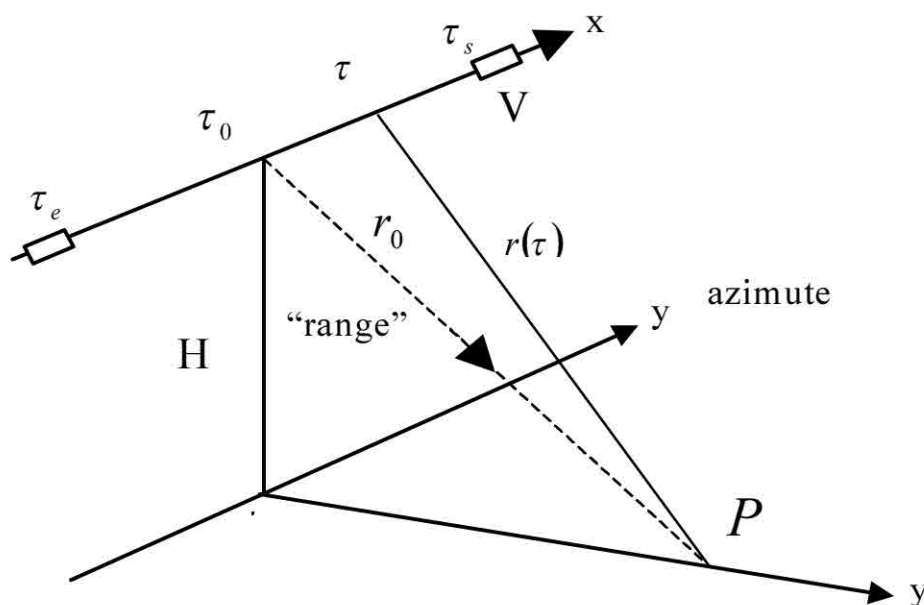


Fig. 2.3 - Ilustração do intervalo da abertura sintética.

O eco recebido de cada pulso enviado, sofre uma variação de frequência e fase devido a velocidade V da plataforma e a variação de distância $r(\tau)$, durante o intervalo $(\tau_s - \tau_e)$. A variação de frequência é conhecida como efeito Doppler, e define a largura de banda Doppler, B_D , que por sua vez define a resolução da imagem SAR, na direção de azimute, da seguinte forma:

$$\rho_a = V/B_D \quad (2.2)$$

2.1.1 Caracterização dos Dados Brutos SAR

Considerando a geometria ilustrada da Figura 2.3, o sinal de retorno do ponto P de coordenada (τ_0, r_0) , a partir da emissão de um pulso complexo $s(t, \tau)$, enviado no instante azimutal τ e radial t , é uma réplica atrasada do sinal emitido. Considerando o fato de que o sinal transmitido viaja em uma velocidade muito maior que da plataforma, pode-se desprezar o efeito de movimento do sensor durante o tempo de ida e volta do sinal do radar. Desta maneira, o sinal recebido de um alvo pontual P, cuja seção transversal possui uma densidade de refletividade complexa $\sigma_{rep}(\tau_0, r_0)$, pode ser escrito como (McDonough et al., 1985):

$$g(t, \tau | \tau_0, r_0) = \sigma_{rep}(\tau_0, r_0) s[t - 2r(\tau - \tau_0; r_0)/c, \tau] \exp\{-j\omega_0[t - 2r(\tau - \tau_0; r_0)/c]\} \quad (2.3)$$

onde τ_0 é o tempo azimutal quando este se encontra mais próximo da plataforma, ou seja, r_0 , ω_0 é a frequência da portadora do pulso do radar e c a velocidade da luz.

A segunda parte da Equação 2.3 é considerada como a *função de resposta a alvo pontual*, representada por:

$$h(t, \tau | \tau_0, r_0) = a[t - 2r(\tau - \tau_0; r_0)/c, \tau] \exp\{j\omega_0[t - 2r(\tau - \tau_0; r_0)/c]\} \quad (2.4)$$

O sinal recebido de todos os pontos da região da superfície da terra, iluminada pelo feixe do radar, representando um mapa de densidade de refletividade complexa, é dado por:

$$g(t, \tau) = \iint_{\Gamma_0 R_0} \sigma_{reMap}(\tau_0, r_0) h(t, \tau | \tau_0, r_0) d\tau_0 dr_0 \quad (2.5)$$

$$t \in T, \quad \tau \in \Gamma$$

onde, (Γ_0, R_0) é a região iluminada pelo pulso emitido no instante t , cujo eco tenha sido recebido no instante τ , e (T, Γ) é o domínio sobre o qual o eco é coletado.

O sinal SAR bruto recebido de cada pulso, pode ser modelado como sendo uma convolução bidimensional do mapa de densidade de refletividade complexa, pela *função de resposta a alvo pontual*.

Considerando a situação mostrada na Figura 2.3, a localização de um ponto P na imagem é caracterizada pela posição em azimuth, no tempo igual a $\tau = \tau_0$, e pela menor distância sensor alvo, r_0 . Enquanto o sensor se move a uma velocidade V , a distância entre o sensor e o retorno, vindo do ponto P, varia não linearmente da seguinte forma:

$$r(\tau) = \sqrt{r_0^2 + V^2 \cdot (\tau - \tau_0)^2} \approx r_0 + \frac{V^2 \cdot (\tau - \tau_0)^2}{2r_0} \quad (2.6)$$

Como o posicionamento do dados amostrados depende do tempo de retorno do eco do radar, e como o tempo depende da distancia $r(\tau)$, as amostras dos dados do ponto P descrevem uma curva de posicionamento na matriz de dados brutos, chamada de curvatura em “*range*”.

Ainda durante o processo de aquisição dos dados, o apontamento da antena não é sempre perpendicular ao movimento da plataforma, como desejado. A variação nos ângulos de arfagem e guinada da plataforma, faz com que o apontamento não seja exatamente de 90° em relação a trajetória. Este desvio do apontamento da antena, provoca um deslocamento da frequência central da variação Doppler (Madsen, 1989), conhecida como “*Doppler centroid*”. O “*Doppler centroid*” diferente de zero, provoca

um deslocamento no posicionamento dos dados, na matriz de dados brutos, de forma linear, conhecido como “range walk”. A composição dos dois deslocamentos dos dados é conhecida como “range migration” (RM).

A Figura 2.4 mostra uma representação do espalhamento das amostras na matriz de dados brutos, referentes a dois alvos pontuais, imageados em “ranges” diferentes. A inclinação da curva é dada pela componente de “range walk”. Nota-se que a curvatura aumenta a medida do aumento de “range”.

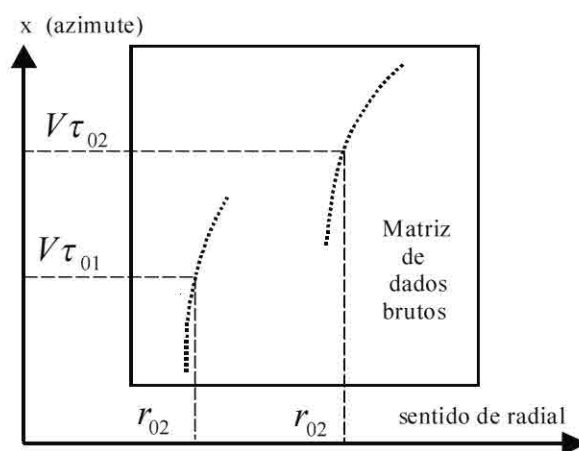


Fig. 2.4 - Representação da “range migration” na matriz de dados SAR brutos.

2.1.2 Formação da Imagem SAR

O objetivo do processamento SAR é produzir a ‘imagem’ representativa do mapa de densidade de refletividade complexa. Isto requer a implementação da *função de resposta a alvo pontual inversa*, que a partir da convolução com o sinal recebido, fornece a imagem complexa do mapa de densidade de refletividade do solo, dada por (Bamler et al., 1993):

$$u(r, \tau) = \iint_{T \Gamma} g'(t, \tau') \cdot h(2r/c - t, \tau - \tau'; r) dt d\tau' \quad (2.7)$$

onde $g'(t, \tau)$ é o sinal recebido após a demodulação quadrática, ou seja, com a frequência portadora removida.

O efeito de “*range migration*”, RM, aumenta a complexidade do processamento da Imagem SAR, influenciando na sua qualidade final. O processamento requer uma convolução bidimensional, variante no espaço, para a focalização dos dados brutos de cada ponto da imagem (Bamler et al., 1992).

A função de resposta a alvo pontual inversa, deve ser atualizada de acordo com a posição de range dos dados brutos. Para que esta convolução bidimensional variante no espaço fosse mais eficiente, foram desenvolvidas diversas técnicas que trabalham no domínio da frequência.

A técnica mais conhecida é a de “*range-Doppler*” (Wu et al., 1982), neste caso, considera-se somente as linearidades do sistema SAR, podendo-se assim desmembrar a convolução bidimensional em duas fases sucessivas, ou seja, primeiramente é feita a convolução dos dados na direção de “*range*” e em seguida na direção de azimuth, também conhecida como compressão em “*range*” e azimuth respectivamente. A correção da RM é realizada na fase anterior a compressão em “*range*”, por interpolação dos dados brutos. Este tipo de processador provoca erros de fase nas duas dimensões.

A técnica de “*range-Doppler*” foi aperfeiçoada no sentido de compensar o erro de fase residual. Nesta técnica a correção da RM é realizada durante a compressão em azimuth, estes algoritmos são chamados de “*range-Doppler*” híbridos (Jin e Wu, 1984). Outras derivações da técnica “*range-Doppler*” foram implementadas, no sentido de corrigir os erros de movimento da plataforma (Moreira, 1990), (Buckreuss, 1991), (Mura, 1993).

Outras técnicas foram desenvolvidas visando uma melhor fidelidade de fase na imagem complexa final, que é de vital importância quando se trabalha com Interferometria, Polarimetria, Filtros para a redução de ruído “*speckle*” complexo, etc.. Existem várias técnicas de convolução bidimensional no domínio da frequência (Rocca et al., 1989), (Raney e Vachon, 1989), (Franceschetti et al., 1995), (Runge e Bamler, 1992), (Raney et al., 1994) e (Moreira e Huang, 1994).

2.2 Princípios da Interferometria SAR

O termo interferometria é derivado da palavra interferência, que expressa um fenômeno resultante da interação entre ondas de qualquer tipo. Interferometria por radar foi utilizada pela primeira vez na observação de Vênus (Roger e Ingalls, 1969) para separar a ambigüidade dos ecos provenientes dos hemisférios norte e sul. Posteriormente, dados de elevação foram obtidos por esta técnica nas observações da Lua (Zisk, 1972) e de Vênus (Rumsey et al., 1974).

A primeira medida de elevação na Terra, obtida por interferometria de imagens de radar aerotransportado, foi realizada por Graham (1974). Posteriormente, Zebker e Goldstein (1986) e Gabriel e Goldstein (1988) propuseram e demonstraram com sucesso a geração de mapas topográficos a partir de Interferometria SAR.

Interferometria SAR é uma técnica que utiliza um par de imagens SAR no formato complexo, de amplitude e fase, para gerar uma terceira imagem complexa, dita imagem interferométrica, cuja fase de cada pixel, dita fase interferométrica, é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens originais.

A fase de cada pixel da imagem interferométrica está relacionada com a elevação do terreno, correspondente a célula de resolução no solo, possibilitando com isso a geração de um Modelo Numérico de Terreno (MNT).

A aquisição de um par de imagens para a geração da fase interferométrica pode ser conseguida de dois modos:

- a) Utilizando-se duas antenas na mesma plataforma, separadas por uma distância chamada de linha-base (B). Esta maneira é conhecida como interferometria de uma passagem, utilizada em plataformas aerotransportadas.
- b) Utilizando-se uma antena com duas passagens sobre a mesma área, também conhecida como interferometria de duas passagens. Nesse caso a linha-base (B) depende da distância entre as duas passagens. A Figura 2.5 ilustra os dois modos utilizados em interferometria SAR.

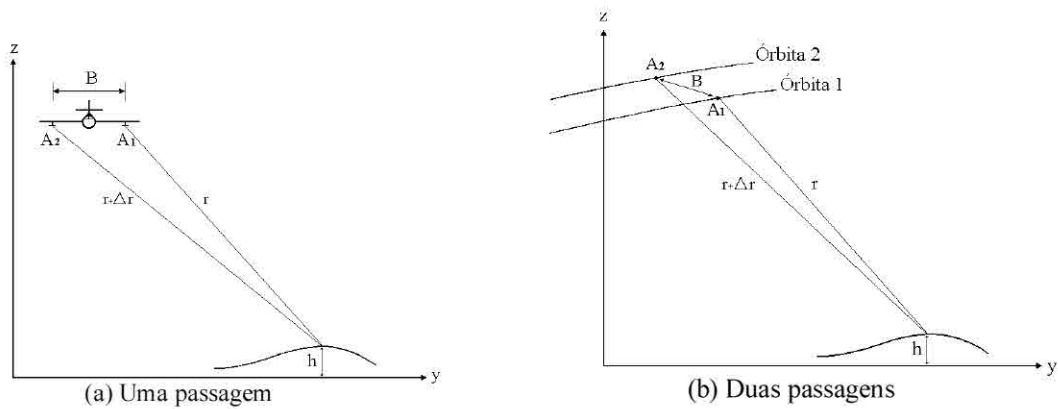


Fig. 2.5 - Modos de aquisição utilizados em interferometria SAR.

2.2.1 Equacionamento InSAR Básico

A geometria básica de um sistema interferométrico SAR é ilustrado na Figura 2.6. As duas antenas A_1 e A_2 são separadas pela linha-base B , de inclinação α , a uma altura H do solo, com um ângulo de incidência θ para a antena A_1 . No caso da *interferometria de duas passagens*, A_1 e A_2 representam as posições de uma mesma antena, separadas de uma distância B não fixa. Nota-se pelo triângulo definidos pelos pontos A_1, A_2 e P , que a variação de distância Δr , está relacionada com a elevação do ponto P .

Os sinais do radar, transmitidos alternadamente pelas antenas A_1 e A_2 , e recebidos pelas respectivas antenas transmissoras, possuem uma diferença de fase que é proporcional a diferença de distância Δr (Graham, 1974), segundo a seguinte equação:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda_T} \quad (2.8)$$

onde, λ_T é o comprimento de onda do sinal transmitido.

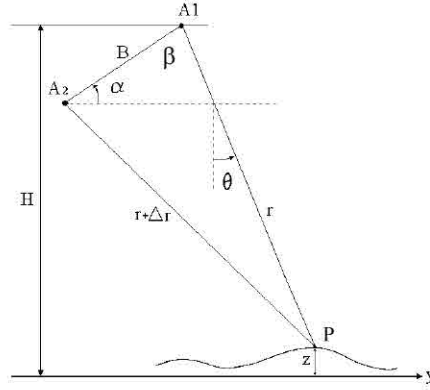


Fig. 2.6 - Geometria básica de um sistema interferométrico SAR.

A variação de distância Δr e consequentemente a variação de fase $\Delta\phi$ depende do comprimento da linha-base, B , distancia entre A_1 e A_2 . Uma linha-base muito pequena faz com que o sinal diferença de fase, seja muito pequeno para ser detectado. Se a linha-base for muito grande, a fase torna-se ruidosa devido a descorrelação espacial (APÊNDICE C), causada pelas diferentes geometrias de aquisição.

A interferometria SAR utiliza a informação de $\Delta\phi$, obtida através da diferença de fase entre as duas imagens, para gerar a informação de Δr , e consequentemente obter o valor de elevação, conhecendo-se as condições de imageamento, tais como: a altura H , a linha-base B e os vetores de estado (velocidade e posicionamento) das antenas.

A partir do triângulo definido pelos pontos A_1, A_2 e P , pela lei dos cosenos, chega-se a seguinte relação:

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \sin(\alpha - \theta) \quad (2.9)$$

A Equação 2.8 pode ser escrita da seguinte forma:

$$r = \frac{B^2 - \Delta_r^2}{2(\Delta_r + B \sin(\alpha - \theta))} \quad (2.10)$$

Dado um ângulo de incidência θ e a distância ' r ' de um ponto genérico P , chega-se a seguinte relação para a elevação deste ponto:

$$z(r, \theta) = H - r \cos \theta \quad (2.11)$$

2.2.2 Registro e Geração da Fase Interferométrica

A obtenção da fase interferométrica, $\Delta\phi$, depende primeiramente do registro preciso, da ordem de sub-pixel, das imagens complexas. Como, em geral, existe uma alta correlação entre as duas imagens, métodos automáticos podem ser empregados. Diversos métodos têm sido utilizados.

O método do espectro máximo, desenvolvido por Gabriel e Goldstein (1988), baseia-se na qualidade das franjas (padrões de interferência que aparecem na fase interferométrica devido a variação na elevação do terreno), onde ocorrer o máximo valor do espectro da imagem interferométrica, representado pelas frequências espaciais, f_x (“range”) e f_y (azimute), obtém-se a melhor qualidade das franjas e consequentemente o melhor registro.

O método da função de correlação cruzada, desenvolvido por Li e Goldstein (1990), é um método que utiliza a correlação entre janelas tomadas nas duas imagens. A função de reamostragem é calculada apenas na direção de “range”, pois este método considera que existe necessidade de reamostragem somente da direção de “range”, e que em azimute um “offset” é suficiente.

O método da função de flutuação média, desenvolvido por Lin et al. (1991), é um método iterativo, que busca a minimização do ruído de registro. Uma Figura de mérito, chamada de função de flutuação média, é utilizada para avaliar o ruído da diferença de fase das imagens.

Técnicas mais recentes, incorporam o processo de registro, junto com o de processamento para a geração da imagem SAR, gerando uma imagem interferométrica em tempo menor e de melhor qualidade (Fornaro et al., 1994), (Fernandes et al., 1997).

Após o registro das imagens complexas, a imagem interferométrica é gerada pela multiplicação dos *pixels complexos* da primeira imagem, com os respectivos *pixels complexos conjugados* da segunda imagem. A fase de cada pixel da imagem resultante, corresponde a diferença de fase dos respectivos pixels das duas imagens.

Seja p_1 um pixel complexo da imagem 1 e p_2 um pixel complexo, de mesma posição, da imagem 2, representados na forma polar por:

$$p_1 = A_1 e^{j\phi_1} \text{ e } p_2 = A_2 e^{j\phi_2} \quad (2.12)$$

O pixel interferométrico p_{int} é dado por:

$$p_{\text{int}} = p_1 \cdot p_2^* = A_1 \cdot A_2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \quad (2.13)$$

onde * indica o complexo conjugado.

A diferença de fase ou fase interferométrica de um pixel interferométrico, p_{int} , é dado pelo argumento de p_{int} , ou seja:

$$\Delta\phi_p = \arg \cdot p_{\text{int}} \quad (2.14)$$

A imagem de fase interferométrica, também conhecida como interferograma, apresenta padrões do tipo franjas, devido ao caráter cíclico da fase (módulo de 2π). A Figura 2.7 ilustra a obtenção do interferograma, a partir da diferença de fase dos pixels das imagens 1 e 2.

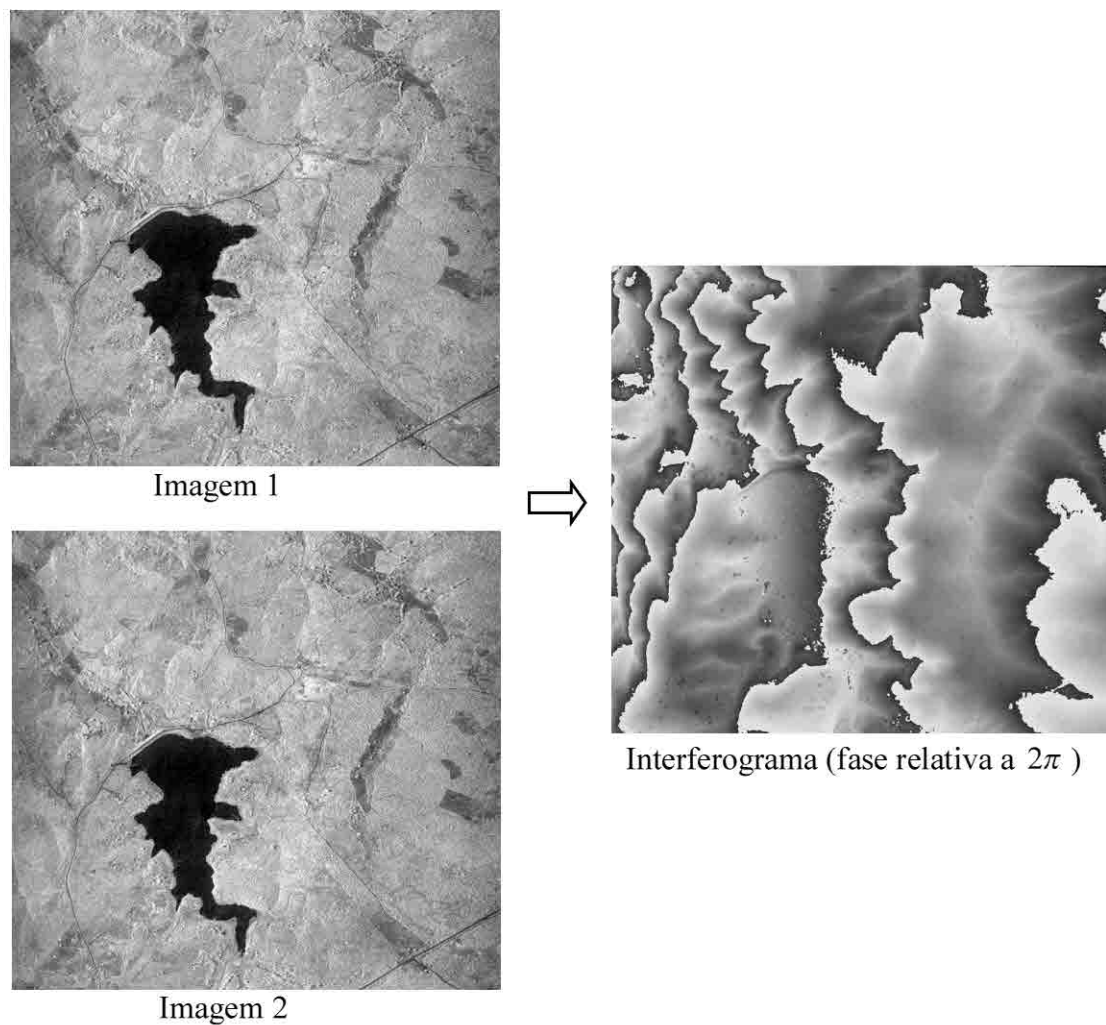


Fig. 2.7 - Ilustração da obtenção do Interferograma.

Ruídos presentes no interferograma são devido principalmente as seguintes fontes: ruído “*speckle*” (APÊNDICE B), ruído térmico do sistema, descorrelação espacial, processo de registro, descorrelação temporal (no caso de duas passagens), processamento SAR e amostragem (APÊNDICE C).

2.2.3 Desdobramento da Fase Interferométrica

Para que a fase interferométrica possa ser utilizada na geração de MNT, o seu carácter cíclico deve ser removido, ou seja, ela deve passar por um processo de desdobramento. A Figura 2.8 ilustra o desdobramento da fase interferométrica.

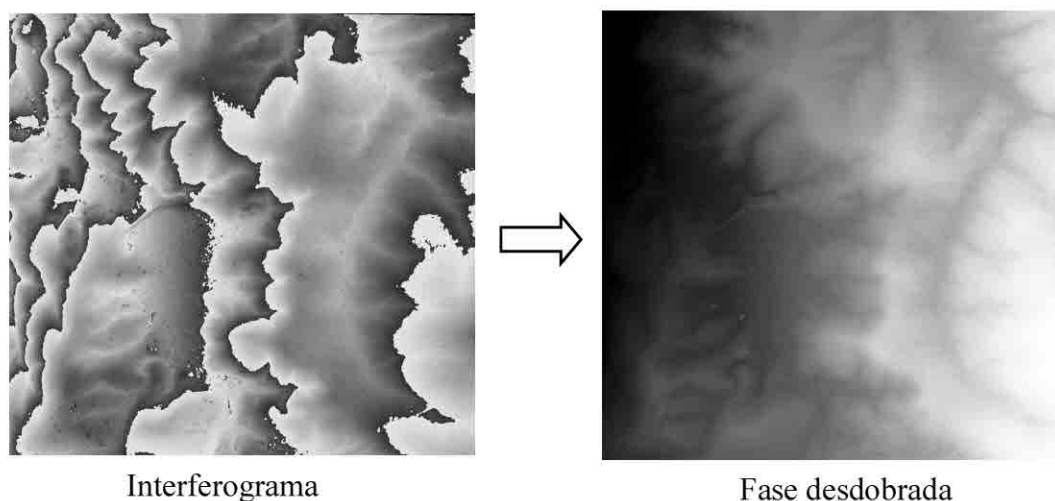


Fig. 2.8 - Ilustração do desdobramento da fase interferométrica.

Supondo-se que os dados SAR sejam amostrados segundo o critério de Nyquist, a diferença de fase de pixel para pixel na imagem interferométrica, não deve ser maior que π (meio ciclo), ou seja: $|\Delta\phi| < \pi$. Ruídos introduzem inconsistência na fase, fazendo com que em certas regiões a diferença de fase seja maior que π . Isto ocorre em partes das imagens SAR onde exista inversão ou sombra (APÊNDICE A), regiões de baixa correlação entre as imagens e onde a inclinação da superfície é maior que a limite (APÊNDICE D).

Para facilitar o processo de desdobramento de fase, diversos processos de filtragem foram desenvolvidos, visando a diminuição do ruído de fase. Uma técnica comum para se reduzir erros estatísticos em um sinal, é através da média amostral. No caso de interferogramas, o estimador ótimo, no sentido da máxima verossimelhança, é a média espacial dos dados complexos (Seymour e Cumming, 1994), em uma etapa anterior ao cálculo do interferograma. Esta técnica de filtragem é conhecida como “*multi-look*”.

Outras técnicas propostas com menor perda de resolução espacial, baseiam-se em filtros de mediana, da moda e morfológicos, adaptados para dados circulares (Candeias et al., 1995), (Mura et al., 1997), ou em processos adaptativos baseados na estatística local do interferograma (Lee, 1997).

Um grande número de algoritmos tem sido proposto na literatura para resolver o problema do desdobramento bidimensional de fase. Basicamente eles podem ser divididos em dois grupos, os que fazem uso de métodos locais e os que utilizam métodos globais.

O primeiro trata a inconsistência de fase, buscando localizar e isolar os pontos inconsistentes, chamados de resíduos, evitando com isso que o processo de desdobramento da fase dependa do caminho de integração (Goldstein et al., 1988). Um outro método deste grupo utiliza o processo de crescimento de regiões (Xu e Cumming, 1996).

O segundo grupo baseia-se na integração global dos dados, ou seja, os algoritmos trabalham no sentido da minimização do erro global. O método dos mínimos quadrados baseia-se na minimização da diferença entre a derivada parcial da fase interferométrica, antes e depois do desdobramento, pela solução da equação de Poisson. Vários métodos de solução da equação de Poisson foram propostos, tais como, a solução pela transformada discreta bidimensional do cosseno (Ghiglia e Romero, 1994), solução pela transformada de Fourier (Pritt e Shipman, 1994) e solução pelo método de relaxação de Gauss-Seidel (Pritt, 1996).

Outros métodos globais baseiam-se em técnicas de multi-resolução, para reconstrução da fase interferométrica desdobrada (Davidson e Bamler, 1996), ou através do uso da formulação de Green (Fornaro et al., 1996).

Técnicas mais recentes procuram tirar vantagens dos dois tipos de métodos, ou seja, a precisão dos métodos locais e a robustez dos métodos globais (Reigber e Moreira, 1997).

2.2.4 “Offset” de Fase Interferométrica

O “offset” de fase presente na fase interferométrica desdobrada, está associado principalmente à célula de resolução do radar, ou seja, normalmente as dimensões de uma célula de resolução são bem maiores que o comprimento de onda do sinal transmitido.

Outro fator que contribui para a existência do “offset” de fase, é a incerteza na medida do “range-delay”, ou seja, a medida do tempo de atraso de retorno do pulso do radar, provocada por desvio na frequência de relógio do radar, desvios na amostragem dos dados ou variações no atraso de propagação devido a mudanças na ionosfera, que provocam incertezas na medida da distância, no sentido de “range”. Estas incertezas fazem com que exista um “offset” na diferença de “range” entre as imagens (Li e Goldstein, 1990).

Estes desvios na diferença de “range”, provocam um erro sistemático na fase, ou seja, um “offset” na fase interferométrica, da seguinte forma:

$$\phi_{off} = \frac{4\pi\Delta r_{off}}{\lambda_T} \quad (2.15)$$

O processo de desdobramento da fase interferométrica, é outra fonte de erro sistemático, ou seja, geram “offset” de fase. Os algoritmos de desdobramento de fase, que utilizam métodos locais, introduzem um “offset” devido à incerteza no ponto de partida do algoritmo (semente). O ponto de partida é guiado pela qualidade do interferograma.

A fase interferométrica absoluta, a fase utilizada para gerar o MNT, é calculada a partir da fase interferométrica desdobrada, como na Equação 2.8, e do “offset” de fase, da seguinte forma:

$$\Delta\phi_{abs} = \Delta\phi_u + \phi_{off} \quad (2.16)$$

onde $\Delta\phi_u$ corresponde à fase interferométrica desdobrada, e ϕ_{off} corresponde ao “offset” de fase, devido a todos os fatores citados.

Os procedimentos, até o presente, envolvidos na determinação do “*offset*” de fase são, a utilização de ponto de controle através de uma geocodificação inversa (APÊNDICE E), o uso de áreas vizinhas geocodificadas e sobrepostas, e através da utilização do método baseado em minimização de função (Pasquali e Holecz., 1998).

A principal contribuição desta tese é um novo método para estimativa do “*offset*” de fase.

2.2.5 Imagem de coerência

A qualidade de um interferograma pode ser medida pelo coeficiente de correlação complexo (Just e Bamler, 1994), dado por:

$$\gamma = \frac{E\{p_1 p_2^*\}}{\sqrt{E\{|p_1|^2\} E\{|p_2|^2\}}}$$
 (2.17)

onde, $E\{\dots\}$ é o valor esperado, p_1 e p_2 são os píxel complexos da imagem 1 e 2.

O coeficiente de correlação complexo é estimado por:

$$\hat{\gamma} = \frac{\langle\langle p_1 p_2^* \rangle\rangle}{\sqrt{\langle\langle |p_1|^2 \rangle\rangle \cdot \langle\langle |p_2|^2 \rangle\rangle}}$$
 (2.18)

onde $\langle\langle \dots \rangle\rangle$ indica um operador de média espacial.

A representação do módulo do coeficiente de correlação complexo, $|\gamma|$, é também conhecida como fator de coerência. A Figura 2.9 ilustra uma imagem de coerência, obtida a partir das imagens 1 e 2 da Figura 2.7.



Fig. 2.9 - Ilustração de uma imagem de coerência.

Regiões de baixa coerência são caracterizadas por regiões onde ocorre inversão ou sombra nas imagens SAR (APÊNDICE A), regiões onde a relação sinal/ruído é muito baixa (regiões escuras na imagem SAR, por exemplo, onde há presença de água).

Observa-se também uma baixa coerência em regiões de vegetação, devido a descorrelação temporal (APÊNDICE C). A imagem de coerência é útil na verificação da qualidade dos dados disponíveis e também no processo de auxílio aos algoritmos de desdobramento da fase interferométrica e de geocodificação.

2.3 Princípios da Geocodificação de Imagens SAR

A Geocodificação de Imagem SAR para fins cartográficos, passa pela geração da orto-imagem SAR sobre uma grade, representada em projeção (UTM, Lambert, etc.), sem as distorções geométricas inerentes de sistemas de radar de visada lateral, como o encurtamento de rampa, a inversão e a sombra (APÊNDICE A), que são erros induzidos pela topografia do terreno.

Devido ao relevo, a forma da Terra não pode ser descrita precisamente através de equações de elipsóide ou geóide, necessitando-se de informações da topografia do terreno, para que as distorções geométricas possam ser corrigidas, no processo de geração das orto-imagens SAR.

A formulação de “*range-Doppler*” para formação de imagem SAR, tem sido também aplicada na geocodificação SAR, onde as coordenadas de um ponto no espaço, são calculadas a partir da medida de “*range*” e da variação de frequência Doppler do ponto, no instante em que este ponto é visto no centro do feixe da antena (Curlander, 1982). Meier et al. (1993) introduziu nesta formulação a informação de elevação do terreno, para que o efeito das distorções geométricas pudessem ser corrigidos.

Para cada elemento da imagem SAR, o valor de “*range*” é calculado durante o processo de formação da imagem, e dado pela seguinte equação, baseado na representação da Figura 2.10:

$$r = |\vec{r}| = |\vec{p} - \vec{s}| \quad (2.19)$$

onde $\vec{p}$ representa o vetor posição de um ponto no solo e $\vec{s}$ o vetor posição da antena.

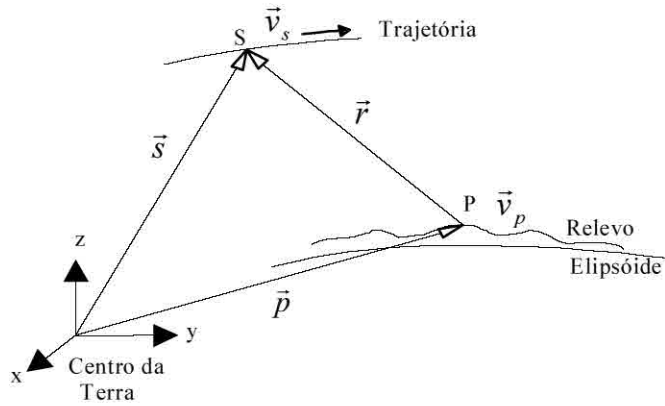


Fig. 2.10 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P.

A variação de frequência Doppler, é estimada durante o processo de formação da imagem SAR (Curlander, 1982), sendo representada pela seguinte equação:

$$f_D = \frac{(\vec{p} - \vec{s})(\vec{v}_p - \vec{v}_s)}{|\vec{p} - \vec{s}|} \frac{2}{\lambda_T} \quad (2.20)$$

onde $\vec{v}_p$ representa o vetor velocidade de um ponto P, $\vec{v}_s$ o vetor velocidade da antena e λ_T o comprimento de onda do sinal transmitido.

No caso do uso de radares orbitais, o vetor de estado da antena, $\vec{s}$ e $\vec{v}_s$, é obtido a partir das amostras dos dados do sistema de navegação do satélite. No caso de radares aerotransportados, normalmente as amostras são adquiridas de plataforma inercial (INS) e de dados de DGPS (Barmetller et al., 1998), garantindo uma melhor acurácia do vetor de estado.

A terceira equação da geocodificação SAR, é a equação do elipsóide de referência, representando o modelo da Terra, junto com a informação da elevação acima do elipsóide, para a correção das distorções provocadas pela topografia do terreno (Schreier, 1993), ou seja:

$$\frac{(p_x^2 + p_y^2)}{(a + h_e)^2} + \frac{p_z^2}{(b + h_e)^2} - 1 = 0 \quad (2.21)$$

onde p_x, p_y e p_z representam as coordenadas cartesianas do vetor posição $\vec{p}$, a e b representam os valores dos semi-eixos maior e menor do elipsóide de referencia, e h_e a altura do terreno acima do elipsóide no ponto P.

A determinação do posicionamento do ponto P no sistema cartesiano, ou seja, p_x, p_y e p_z , passa pela solução das Equações 2.19, 2.20 e 2.21, que constituem um sistema de equações não lineares, podendo ser solucionado por métodos numéricos, como o método de Newton, o método de Broyden, etc. (Press et al., 1992). Este modo de determinação das coordenadas cartesianas de um ponto, a partir do vetor de estado da antena, é conhecido como geocodificação direta.

2.3.1 Geocodificação de imagens SAR interferométricas

A geocodificação de imagens SAR interferométricas, segue as mesmas equações da formulação “*range-Doppler*” mostradas anteriormente. A diferença está no modo de obtenção da elevação do terreno, que neste caso é obtida a partir da fase interferométrica absoluta. Diversos métodos de conversão da fase interferométrica absoluta em medida de elevação do terreno, têm sido propostos.

O método da linha-base normal, proposto por Prati et al. (1990), utiliza uma linha-base normal fixa para toda faixa imageada, com isso, introduzindo erro ao longo de “*range*”. O método da integração do ângulo de incidência, proposto por Li e Goldstein (1990), utiliza uma linha-base normal variável ao longo da faixa imageada, estima o ângulo de incidência θ para cada amostra em “*range*”, e calcula a altura segundo a Equação 2.11, o método apresenta problemas de acumulação de erros. Outro método baseado em uma tabela, construída empiricamente a partir de um conjunto de elipsóides (Schwäbisch, 1995), cria um conjunto de parâmetros que governa a conversão da fase interferométrica absoluta em altura. Este último método é superior aos anteriores em relação a exatidão altimétrica, segundo Small et al. (1996).

Outra metodologia proposta, não necessita da conversão da fase interferométrica absoluta em altitude, mas utiliza o próprio valor desta fase, para o cálculo das coordenadas cartesianas de um ponto genérico P, sendo mais preciso e rápido computacionalmente.

O método proposto por Goblirsch e Pasquali (1996), calcula a posição de P a partir da solução conjunta das equações de “range-Doppler” para as duas antenas, levando em consideração que a diferença de distância entre as antenas e o ponto P, é governada pela fase interferométrica absoluta, segundo a Equação 2.8.

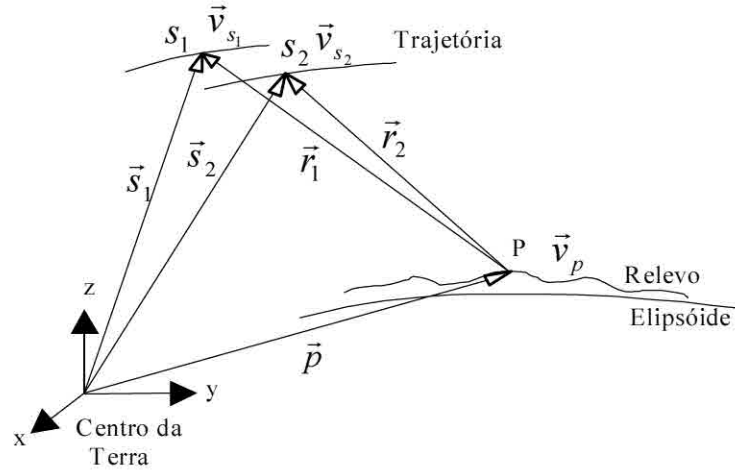


Fig. 2.11 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P, para aquisição de dados no modo interferométrico.

O equacionamento de “range-Doppler” conjunto para as duas antenas, que é a metodologia utilizada na avaliação dos resultados deste trabalho, está baseado na representação da Figura 2.11, e é composto da:

equação de “range” da antena 1,

$$r_1 = |\vec{r}_1| = |\vec{p} - \vec{s}_1| \quad (2.22)$$

da equação Doppler da antena 1,

$$f_{D_1} = \frac{(\vec{p} - \vec{s}_1)(\vec{v}_p - \vec{v}_{s_1})}{r_1} \frac{2}{\lambda_T} \quad (2.23)$$

da equação de “range” da antena 2,

$$r_2 = r_1 + \Delta_r = r_1 + \frac{\lambda \Delta \phi_{abs}}{4\pi} \quad (2.24)$$

da equação Doppler da antena 2,

$$f_{D_2} = \frac{(\vec{p} - \vec{s}_2)(\vec{v}_p - \vec{v}_{s_2})}{r_2} \frac{2}{\lambda_T} \quad (2.25)$$

onde s_1 representa a antena 1 e s_2 a antena 2.

O ponto P no sistema cartesiano, determinado através da solução do sistema de equações não lineares, representado pelas Equações 2.22 2.23, 2.24 e 2.25, pode ser reposicionado em um mapa de projeção e elipsóide desejado, através das transformações de sistemas de referência (Frei, 1993). Reposicionando todos os pontos, pode-se gerar a orto-imagem carta e o MNT geo-referenciados.

CAPÍTULO 3

CALIBRAÇÃO DE FASE INTERFEROMÉTRICA

3.1 Método Utilizando Ponto de Controle

O uso de pontos de controle é o meio mais exato para a determinação do “*offset*” da fase interferométrica. Normalmente utiliza-se como ponto de controle em imagem de radar, um refletor de canto, “*corner reflector*”, cuja forma mais comum é o triedro triangular (Curlander e McDonough, 1991), de material metálico, cujo tamanho depende do comprimento de onda utilizado pelo radar.

Para se gerar um ponto de controle, coloca-se o vértice do refletor de canto em um ponto de coordenadas e altitude conhecidos, com o eixo central direcionado perpendicularmente a linha de vôo do radar, como ilustrado na Figura 3.1 .



Fig. 3.1 – Refletor de canto.

O forte sinal de retorno serve como ponto de controle, como pode ser visto na imagem SAR da Figura 3.2. Através de um ponto de controle tem-se as seguintes informações: a coordenada cartesiana do ponto, (p_x, p_y, p_z) , medido através de GPS, e a identificação da linha e coluna na imagem SAR, (l_p, c_p) , onde o ponto está localizado.

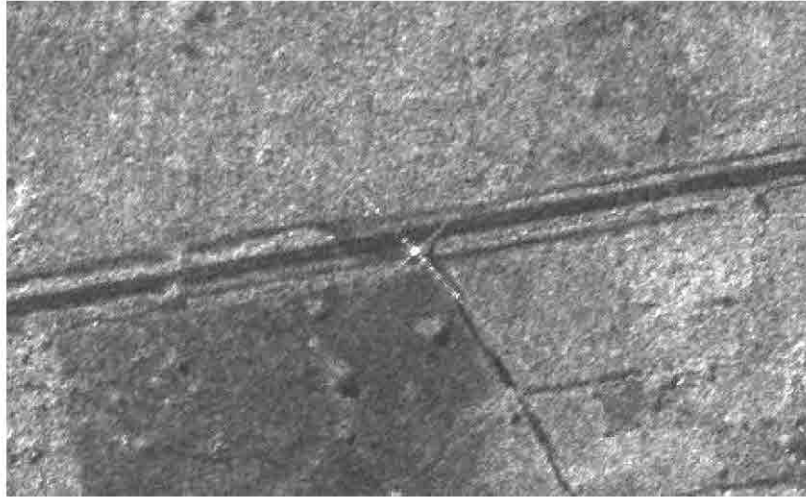


Figura 3.2 – Ponto de controle na imagem SAR.

Para que o “*offset*” de fase seja determinado, primeiramente determina-se o valor da fase interferométrica absoluta, correspondente ao ponto de coordenada (p_x, p_y, p_z) , através da geocodificação SAR inversa (APÊNDICE E).

O “*offset*” de fase pode então ser calculado a partir da diferença entre o valor da fase absoluta pontual e o valor da fase desdobrada, na posição (l_p, c_p) , ou seja:

$$\phi_{off} = \Delta\phi_{abs(p)} - \Delta\phi_{u(l_p, c_p)} \quad (3.1)$$

onde $\Delta\phi_{abs(p)}$ representa o valor da fase absoluta pontual, relacionada ao ponto de controle, e $\Delta\phi_{u(l_p, c_p)}$ o valor da fase desdobrada pontual, na coordenada (l_p, c_p) .

Como o valor de “*offset*” de fase é único para todo interferograma, este valor é somado a todos os pontos da fase desdobrada, para se obter a fase interferométrica absoluta, que é utilizada na geração do MNT.

3.2 Método de Minimização do Erro Global

Este método trabalha com dados de duas aquisições, em direções opostas de voo, com uma área de sobreposição entre as duas faixas imageadas, como ilustrado na Figura 3.3. Este modo de aquisição é comum em mapeamento sistemático.

O método estima os “*offset*” de fase das duas aquisições, de tal maneira que o erro quadrático médio entre os MNTs, correspondentes as duas aquisições, na área comum imageada, seja mínimo.

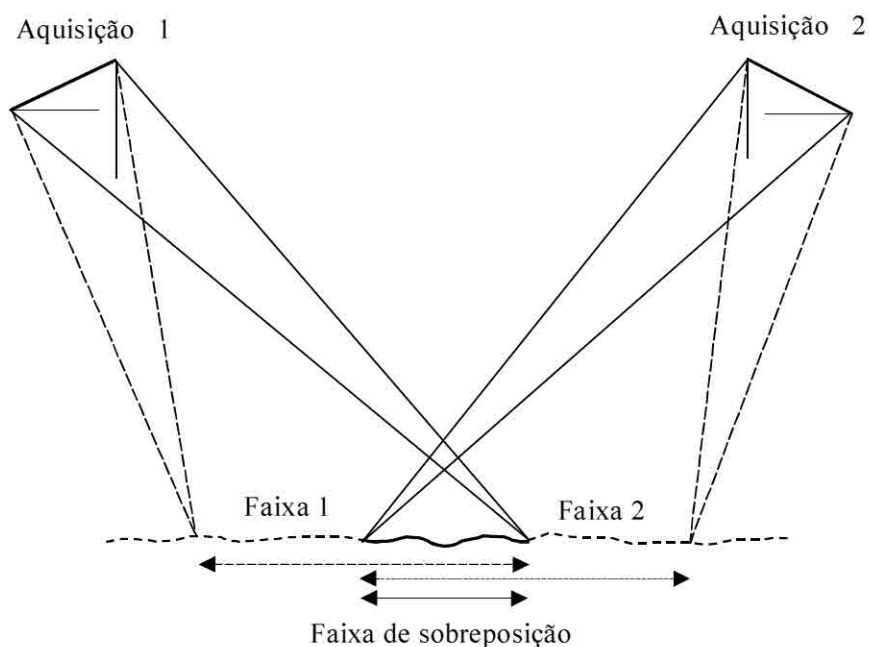


Fig. 3.3 - Aquisições em direções oposta.

O MNT correspondente a cada aquisição, é calculado a partir da solução conjunta das Equações 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 e 2.24, onde o valor da fase interferométrica absoluta na Equação 2.23, pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\Delta\phi_{abs} = \Delta\phi_u + \hat{\phi}_{off} \quad (3.2)$$

onde $\Delta\phi_u$ representa a fase interferométrica desdobrada, e $\hat{\phi}_{off}$ representa o “*offset*” de fase estimado.

O método proposto por Pasquali e Holecz (1998) (comunicação pessoal), busca a minimização da função de erro quadrático médio entre os MNTs. O erro é avaliado em uma janela dentro da área de sobreposição, ou seja:

$$\varepsilon_{MNT} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} [MNT_1(i,j) - MNT_2(i,j)]^2}{N_{janela}}} \quad (3.3)$$

O método utiliza algoritmo de minimização de função, através do método numérico de interpolação parabólica (Press et al., 1998). O algoritmo busca o erro mínimo global entre os MNTs, na janela de avaliação, de onde se estima os valores dos “offset” de fase das duas aquisições, $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$.

A Figura 3.4 ilustra o processo de busca do erro mínimo global, através da determinação do ponto de mínimo da primeira parábola, e em seguida do ponto de mínimo da segunda parábola, ortogonal a primeira, representadas pela função de erro.

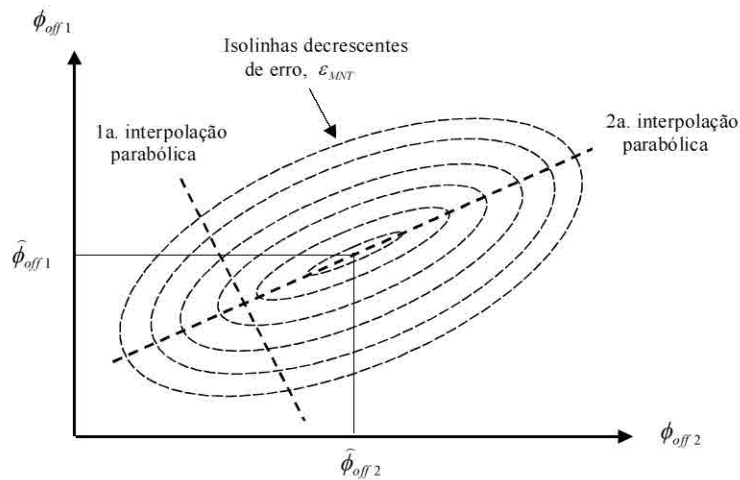


Fig. 3.4 – Ilustração do processo da estimativa dos “offset” de fase.

Este método consome muito tempo de processamento, pois a cada interação, ou seja, a cada estimativa de $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$, calcula-se o MNT de ambas as janelas, na área de sobreposição, para que o erro seja avaliado. Apesar da convergência lenta do método, ele é robusto, e os valores estimados dos “offset” de fase, normalmente estão bem próximos daqueles obtidos através de pontos de controle.

3.3 O Novo Método Proposto

O novo método proposto neste trabalho para calibração de fase, utiliza também duas aquisições, com uma área de sobreposição entre elas, como ilustrado na Figura 3.2. O método baseia-se na construção de funções $\Phi_{off1}(h)$ e $\Phi_{off2}(h)$, que relacionam “offset” de fase com altitude, para ambas as aquisições, em um conjunto de pontos na região de sobreposição. Para cada ponto, cria-se uma outra função que relaciona $\Phi_{off1}(h)$ com $\Phi_{off2}(h)$, através de um processo de interpolação. A família das novas funções apresenta um ponto de cruzamento, de onde pode se estimar os valores dos “offset” de fase, $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$.

3.3.1 Equacionamento do Método

O equacionamento básico do método esta baseado na geometria de aquisição, ou seja, nas duas aquisições em direções opostas, ilustrada na Figura 3.5.

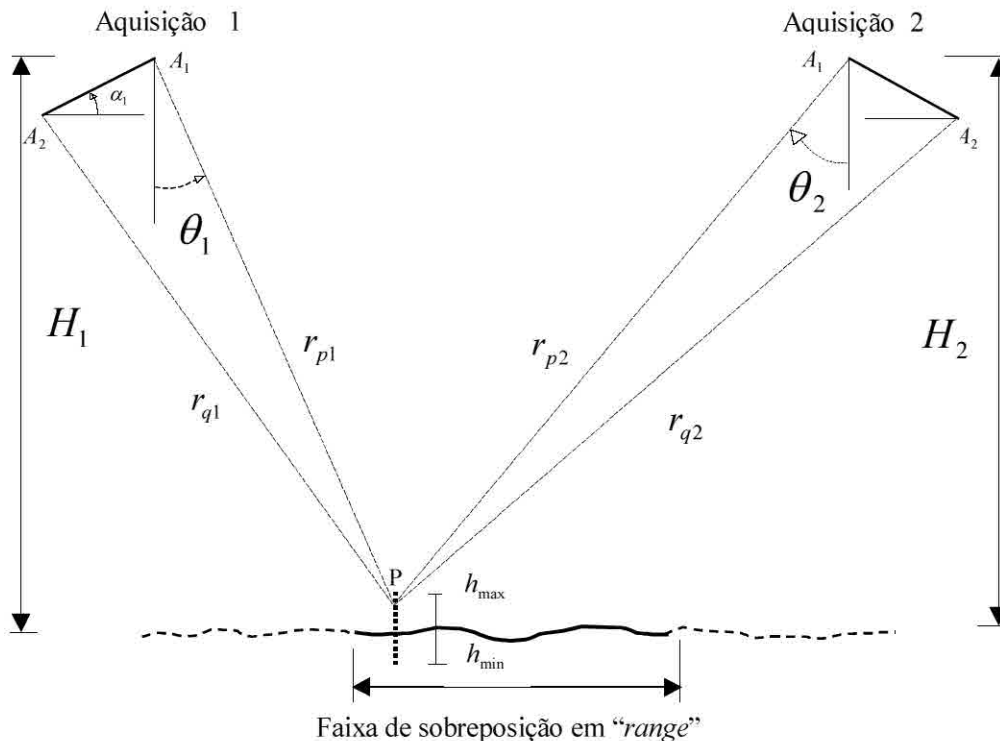


Fig. 3.5 - Geometria de aquisição do método proposto.

Segundo a Equação 2.11, a partir das fases interferométricas desdobradas $\Delta\phi_{u1(P)}$ e $\Delta\phi_{u2(P)}$ de ambas as aquisições, a altura do ponto P, representado na Figura 3.5, pode ser calculado da seguinte maneira:

- Aquisição 1:

$$h = H_1 - [\Delta_{r1} + r_{q1}] \cos \theta_1 = H_1 - \left[\frac{\lambda}{4\pi} (\Delta\phi_{u1(P)} + \phi_{off1}) + r_{q1} \right] \cos \theta_1 \quad (3.4)$$

- Aquisição 2:

$$h = H_2 - [\Delta_{r2} + r_{q2}] \cos \theta_2 = H_2 - \left[\frac{\lambda}{4\pi} (\Delta\phi_{u2(P)} + \phi_{off2}) + r_{q2} \right] \cos \theta_2 \quad (3.5)$$

onde Δ_{r1} e Δ_{r2} representam as diferenças de distância, r_{q1} e r_{q2} as distâncias entre o ponto P e a antena secundária A_2 do radar, para as duas aquisições, e ϕ_{off1} e ϕ_{off2} os “offset” de fase das duas aquisições.

Relacionando as Equações 3.4 e 3.5, obtêm-se:

$$H_1 - \left[\frac{\lambda}{4\pi} (\Delta\phi_{u1(P)} + \phi_{off1}) + r_{q1} \right] \cos \theta_1 = H_2 - \left[\frac{\lambda}{4\pi} (\Delta\phi_{u2(P)} + \phi_{off2}) + r_{q2} \right] \cos \theta_2 \quad (3.6)$$

Escrevendo ϕ_{off1} em função de ϕ_{off2} , tem-se:

$$\phi_{off1} = \phi_{off2} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} + \Delta\phi_{u2(P)} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - \Delta\phi_{u1(P)} + \frac{4\pi}{\lambda \cos \theta_1} [(r_{q2} \cos \theta_2 - r_{q1} \cos \theta_1) + (H_1 - H_2)] \quad (3.7)$$

Para um ponto genérico P de altura h, o último termo da Equação 3.7 pode ser igualado a zero, ou seja:

$$r_{q1} \cos \theta_1 = H_1 - h - B_v \quad (3.8)$$

$$r_{q2} \cos \theta_2 = H_2 - h - B_v \quad (3.9)$$

onde B_v é a componente vertical nominal da linha-base.

Considerou-se para as duas aquisições, o mesmo valor da componente vertical da linha-base, segundo as Equações 3.8 e 3.9, pois a compensação de movimento da aeronave, durante a fase de geração da imagem SAR, ajusta as componentes vertical e horizontal da linha-base, para valores nominais.

Substituindo as Equações 3.8 e 3.9 no último termo da Equação 3.7, este termo se anula.

A Equação 3.7 fica portanto igual a:

$$\phi_{off1} = \phi_{off2} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} + \Delta \phi_{u2(P)} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - \Delta \phi_{u1(P)} \quad (3.10)$$

Através da relação entre os ângulos de incidência no ponto P, define-se o seguinte coeficiente:

$$K_{\theta(P)} = \cos \theta_2 / \cos \theta_1 \quad (3.11)$$

O coeficiente $K_{\theta(P)}$ varia de acordo com a posição de “range”. Normalmente para sistemas de radar imageador aerotransportado, o ângulo θ varia entre 25° e 60° , com isso o coeficiente varia entre 0.5 e 1.8. A Equação 3.10 pode ser escrita como:

$$\phi_{off1} = \phi_{off2} K_{\theta(P)} + \Delta \phi_{u2(P)} K_{\theta(P)} + \Delta \phi_{u1(P)} \quad (3.12)$$

Considerando o caso ideal, ou seja, a ausência de ruídos de fase (APÊNDICE C) nos interferogramas, a Equação 3.12 deve ser satisfeita para qualquer ponto P_i de altura h_i , na área de sobreposição, da seguinte maneira:

$$\phi_{off1} = \phi_{off2} K_{\theta(h_i)}^i + \Delta \phi_{u2(h_i)}^i K_{\theta(h_i)}^i + \Delta \phi_{u1(h_i)}^i \quad (3.13)$$

Como não se conhece a altura h_i de cada ponto P_i , cria-se funções, $\Phi_{off1}^i(h)$ e $\Phi_{off2}^i(h)$, de “offset” de fase em função da altura, para $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$, para a primeira aquisição e para a segunda aquisição respectivamente, no ponto P_i . Estas funções satisfazem as seguintes condições:

$$\Phi_{off1}^i(h_i) = \phi_{off1} \quad (3.14 a)$$

e

$$\Phi_{off2}^i(h_i) = \phi_{off2} \quad (3.14 b)$$

Na vizinhança de h_i , pertencente ao intervalo $[h_{\min}, h_{\max}]$, a Equação 3.13 pode ser colocada da seguinte forma:

$$\Phi_{off1}^i(h) = \Phi_{off2}^i(h) \cdot K_{\theta(h)}^i + \Delta\phi_{u2(h)}^i \cdot K_{\theta(h)}^i + \Delta\phi_{u1(h)}^i \quad (3.15)$$

para h pertencente à vizinhança de h_i .

Na vizinhança de h_i , a Equação 3.15 comporta-se como uma função linear, cujo gradiente é igual a $K_{\theta(h)}^i$ e valor médio igual a $\Delta\phi_{u2(h)}^i \cdot K_{\theta(h)}^i + \Delta\phi_{u1(h)}^i$.

Tomando um outro ponto P_j , de altura h_j , na área de sobreposição, em uma localização em “range” diferente de P_j , ou seja, com um $K_{\theta(h_j)}^j$ diferente de $K_{\theta(h_i)}^i$, a Equação 3.13 pode ser escrita como:

$$\Phi_{off1}^j(h) = \Phi_{off2}^j(h) \cdot K_{\theta(h)}^j + \Delta\phi_{u2(h)}^j \cdot K_{\theta(h)}^j + \Delta\phi_{u1(h)}^j \quad (3.16)$$

para h pertencente à vizinhança de h_j .

Também neste caso, a Equação 3.16 comporta-se como uma função linear, cujo gradiente é igual a $K_{\theta(h)}^j$ e valor médio igual a $\Delta\phi_{u2(h)}^j \cdot K_{\theta(h)}^j + \Delta\phi_{u1(h)}^j$.

Como deve existir um único par de valor, $(\phi_{off1}, \phi_{off2})$, satisfazendo as Equações 3.15 e 3.16, estas funções devem se cruzar no ponto $[\Phi_{off1}^i(h_i), \Phi_{off2}^i(h_i)]$, coincidente com $[\Phi_{off1}^j(h_j), \Phi_{off2}^j(h_j)]$, no plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} .

No caso ideal, sem ruídos de fase, dada uma família de funções definidas em um conjunto de pontos, na área de sobreposição, elas se cruzam em um único ponto, no plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} , que define os “offset” de fase, ou seja, ϕ_{off1} e ϕ_{off2} .

No caso real, ou seja, devido a ruídos de fase presentes nos interferogramas, as funções não se cruzam em único ponto, no plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} , mas em um agrupamento de pontos sobre o ponto verdadeiro, e na vizinhança próxima.

Para que a estimativa dos “*offset*” de fase seja boa, deve-se utilizar vários pontos na áreas de sobreposição. O número mínimo de pontos necessários para se gerar o grupo de funções de “*offset*” de fase, foi estimado segundo uma simulação estatística descrita no APÊNDICE H. Estimou-se que acima de 60 pontos os valores de “*offset*” de fase se estabilizam. Para que praticamente todos os tipos de topografia sejam atendidos, com uma margem de segurança, considera-se que 100 pontos seja um número apropriado.

Além disso, os pontos escolhidos devem estar posicionados em locais onde o fator de coerência, definido no item 2.2.5, esteja acima de um certo limiar, o valor 0.5 mostrou-se apropriado. Isto garante que pontos localizados em locais muito ruidosos na fase desdobrada não sejam utilizados, com isso, o ponto de cruzamento no plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} , pode ser melhor determinado, obtendo-se assim uma melhor estimativa dos valores de “*offset*” de fase, ou seja, $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$.

Para que os cruzamento sejam bem definidos, recomenda-se também que o grupo de pontos analisados, sejam metades posicionados na região de sobreposição mais próxima da aquisição 1, e a outra metade o mais próxima de aquisição 2, para que se tenha K_θ bem distintos em cada metade, garantindo inclinações diferentes na região de cruzamento das funções.

3.3.2 Algoritmo para a Estimativa dos Valores de “*Offset*” de Fase

Para cada ponto selecionado dentro da área de sobreposição, calcula-se o “*offset*” de fase em função da altura, no intervalo entre h_{min} a h_{max} , como ilustrado na Figura 3.5, segundo a seguinte sequência de operações:

- a) Para um determinado ponto genérico P_j na área de sobreposição, de coordenadas e altitude conhecidos, calcula-se primeiramente a diferença de “range”, $r_{pi} - r_{qi}$, utilizando método de geocodificação SAR inversa (APÊNDICE E).

- b) A partir da diferença de “range”, calcula-se a diferença de fase absoluta, relacionada ao do ponto P_j , para ambas as aquisições, ou seja:

$$\Delta\phi_{abs_i(h)}^j = \frac{4\pi}{\lambda}(r_{pi} - r_{qi}) \quad (3.17)$$

onde i indica a aquisição e h a altura a partir da qual se calcula a diferença de “range”.

- c) Calcula-se o “offset” de fase no ponto P_j , de altura ‘h’, para ambas as aquisições, ou seja:

$$\Phi_{off_i}^j(h) = \Delta\phi_{abs_i(h)}^j - \Delta\phi_{u_i(h)}^j(l_i, c_i) \quad (3.18)$$

onde $\Delta\phi_{u_i(h)}^j(l_i, c_i)$ representa a fase desdobrada pontual, na coordenada (l_i, c_i) , correspondente a aquisição i

- d) Repete-se as operações (a), (b) e (c) para o mesmo ponto P_j , para uma nova altura $h + \delta_h$. Estas operações são repetidas até que todo intervalo de h_{min} a h_{max} seja varrido, e as funções de “offset” de fase, correspondente ao ponto P_j , sejam criadas.

- e) As duas funções de “offset” de fase, correspondentes às duas aquisições, no ponto P_j , são colocados uma em função da outra, por um processo de interpolação linear por vizinho mais próximo, criando uma terceira função, da seguinte maneira:

$$g_j(\Phi_{off1}^j, \Phi_{off2}^j) = I_{LIN_{h_{min} \rightarrow h_{max}}}[\Phi_{off1}^j(h), \Phi_{off2}^j(h)] \quad (3.19)$$

- f) Repete-se as operações de (a) até (e), para um grupo de pontos na região de sobreposição, gerando com isso uma família de funções representadas pela Equação (3.19).

- g) Calcula-se o ponto de cruzamento do grupo de funções, para que os “offset” de fase das duas aquisições, $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$, sejam determinados.

3.3.3 Implementação do Método

O primeiro passo para a implementação do método, consiste em identificar a região de sobreposição, para que a área de atuação do método seja estabelecida. Após esta identificação, extrai-se desta região as fases desdobradas e as imagens de coerência de ambas as aquisições. Em seguida, são aplicadas uma série de operações, ilustradas na Figura 3.6., para que os valores de “offset” de fase sejam determinados.

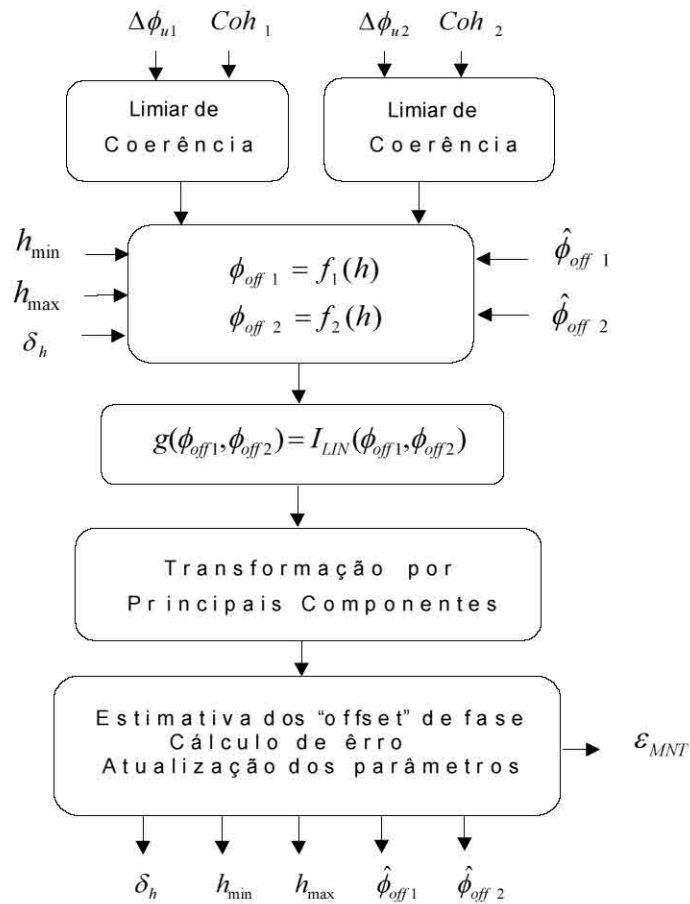


Fig. 3.6 – Sequência de operações do método.

Os interferogramas são validados de acordo com um valor limite de coerência, ou seja, pontos na área de sobreposição com fator de coerência abaixo 0.5 (valor determinado empiricamente), não são utilizados na construção do grupo de funções de “offset” de fase, pois estes pontos podem comprometer a qualidade destas funções.

O método proposto trabalha em duas etapas, na primeira estima-se grosseiramente os “offset”, e na segunda etapa realiza-se uma estimativa mais fina.

- Primeira etapa:

1) *Determina-se os parâmetros $h_{\min}$ e $h_{\max}$ de tal forma que garantam o cruzamento das funções de “offset” de fase. Estes parâmetros são calculados a partir do conhecimento da altitude média da área imageada., e dos valores máximo e mínimo da fase desdobrada, na área de sobreposição.*

2) *Determina-se o incremento de altitude , utilizando a seguinte regra básica:*

$$\delta_h = 10 \cdot \rho_h \quad (3.20)$$

onde ρ_h representa a resolução altimétrica do modelo de elevação.

3) *Determina-se o número de passos para a construção das funções de “offset” de fase, ou seja:*

$$N_p = (h_{\max} - h_{\min}) / \delta_h \quad (3.21)$$

4) *Estima-se grosseiramente os “offset” de fase, $\hat{\phi}_{\text{off}1}$ e $\hat{\phi}_{\text{off}2}$, segundo o algoritmo descrito no item 3.3.2.*

5) *Gera-se os MNTs de ambas as aquisições, na área de sobreposição, e calcula-se o erro quadrático médio entre eles, ε_{MNT} , para verificar a validade de $\hat{\phi}_{\text{off}1}$ e $\hat{\phi}_{\text{off}2}$. Um valor muito alto de ε_{MNT} , indica que a qualidade das fases desdobradas, na área de sobreposição, são muito ruidosas, ou seja, uma área predominantemente de baixa coerência.*

- Segunda etapa:

- 1) Calcula-se a altitude de cada ponto P_j , do grupo utilizado na primeira etapa, h_j , e ajusta-se um intervalo de avaliação Δ_h^j , cujo módulo do intervalo seja 10 vezes menor que o da primeira etapa:

$$|\Delta_h^j| = |(h_{\max} - h_{\min})/10| \quad (3.22)$$

- 2) Calcula-se para cada ponto P_j , o valor máximo e mínimo da altura do intervalo de avaliação:

$$h_{j\ MIN} = h_j - |\Delta_h^j|/2 \quad (3.23)$$

$$h_{j\ MAX} = h_j + |\Delta_h^j|/2 \quad (3.24)$$

- 3) Altera-se o incremento de altitude para um degrau menor:

$$\delta_h = \rho_h \quad (3.25)$$

- 4) Estima-se de maneira mais fina os “offset” de fase, $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$, segundo o algoritmo descrito no item 3.3.2.
- 5) Gera-se os MNTs de ambas as aquisições, na área de sobreposição, e calcula-se o erro quadrático médio entre eles, ε_{MNT} .

Para exemplificar o funcionamento do método, a Figura 3.7 ilustra o cruzamento da família de funções de “offset” de fase, no plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} , geradas de acordo com o item 3.3.3, durante a primeira (a) e segunda (b) etapa do método. Neste exemplo utilizou-se 100 pontos para a geração das funções de “offset” de fase, e um incremento altimétrico inicial, δ_h , de 5 metros, para a primeira etapa e 0.5 metros para a segunda etapa.

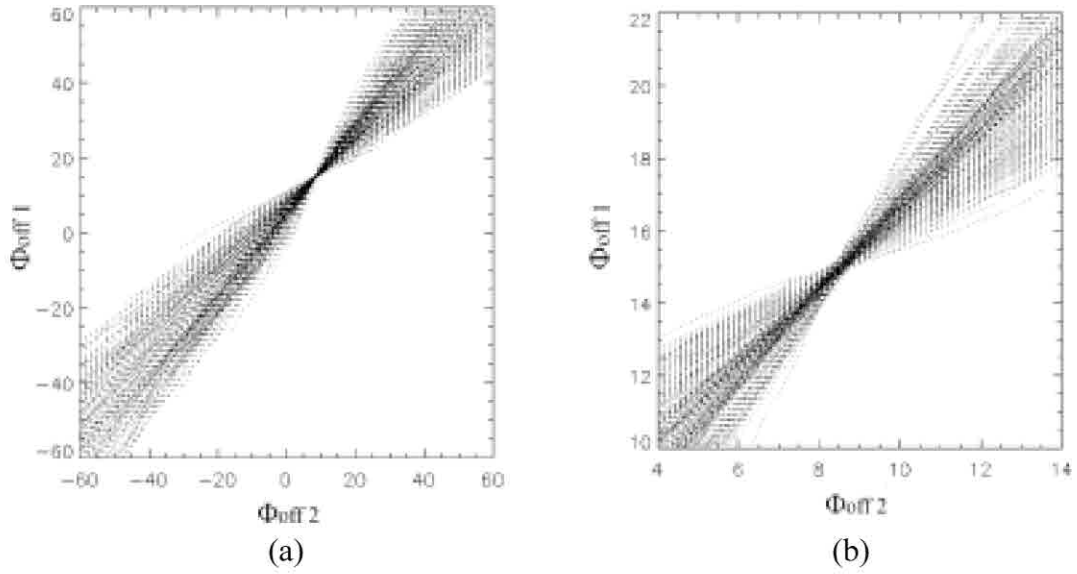


Figura 3.7 - Representação da família de funções de “offset” de fase, nas duas etapas.

Nota-se na Figura 3.7 (b) uma maior dispersão do ponto de cruzamento, pois a medida que a escala do plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} , seja menor, observa-se melhor a dispersão, devido a presença de ruído de fase presente nas fases desdobradas.

A estimativa do ponto de cruzamento das funções de “offset” de fase, como ilustrado na Figura 3.7, e consequentemente dos valores de $\hat{\phi}_{off1}$ e $\hat{\phi}_{off2}$, pode ser realizada através da medida de dispersão das funções, no plano definido por Φ_{off1} e Φ_{off2} .

Um meio de medir esta dispersão, é através da medida da variância de Φ_{off1} em relação a Φ_{off2} , para a estimativa do “offset” de fase da primeira aquisição, $\hat{\phi}_{off1}$, e da medida da variância de Φ_{off2} em relação a Φ_{off1} , para a estimativa do “offset” de fase da segunda aquisição, $\hat{\phi}_{off2}$. Contudo este processo não é muito exato quando a orientação das funções de “offset” de fase, estão próximas dos eixos.

Este problema pode ser solucionado, através da rotação das funções de “offset” de fase, em relação ao eixo da orientação principal destas funções. Desta maneira, o ponto de cruzamento das funções pode ser estimado mais facilmente, através da medida da variância das funções rotacionadas, em relação ao eixo principal, e da média das

funções rotacionadas no ponto de variância mínima. O método de rotação utilizado, foi o da Transformação por Principais Componentes (Richards, 1993), bidimensional, definida no plano de Φ_{off1} e Φ_{off2} , onde cada amostra da família de funções é tratada como um vetor.

A direção resultante, ou seja, o eixo principal de rotação da transformação, é dado pelos auto-vetores da matriz de covariância das amostras. A Figura 3.8 ilustra a família de funções rotacionadas, correspondentes à ilustração da Figura 3.7 (a), utilizando-se a Transformação por Principais Componentes.

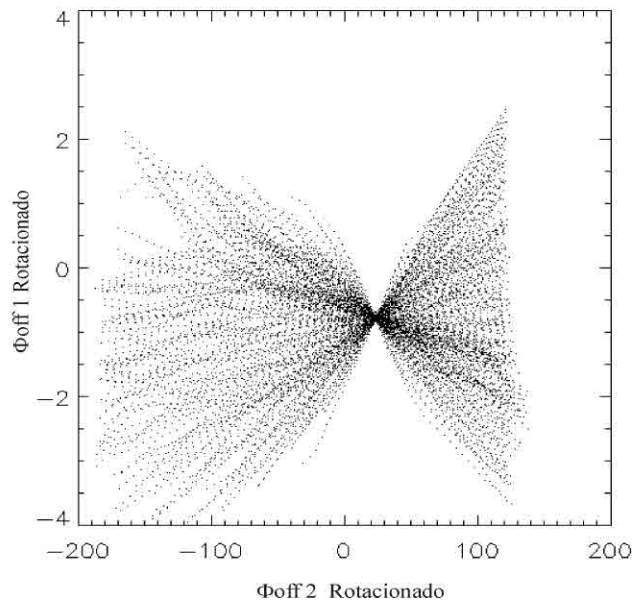


Fig. 3.8 - Transformação por Principais Componentes das funções de “offset” de fase.

Como pode ser visto na Figura 3.9, o ponto de cruzamento das funções rotacionadas pode ser facilmente estimado, ou seja, determina-se $\hat{\phi}_{R\ off\ 2}$ através da medida da variância mínima das funções rotacionadas, em relação ao eixo principal, e $\hat{\phi}_{R\ off\ 1}$, através da média das funções rotacionadas no ponto de variância mínima. A Figura 3.9, parte inferior, ilustra a família de funções rotacionadas, bem como a correspondente variância, parte superior, referente a ilustração da Figura 3.7 (b).

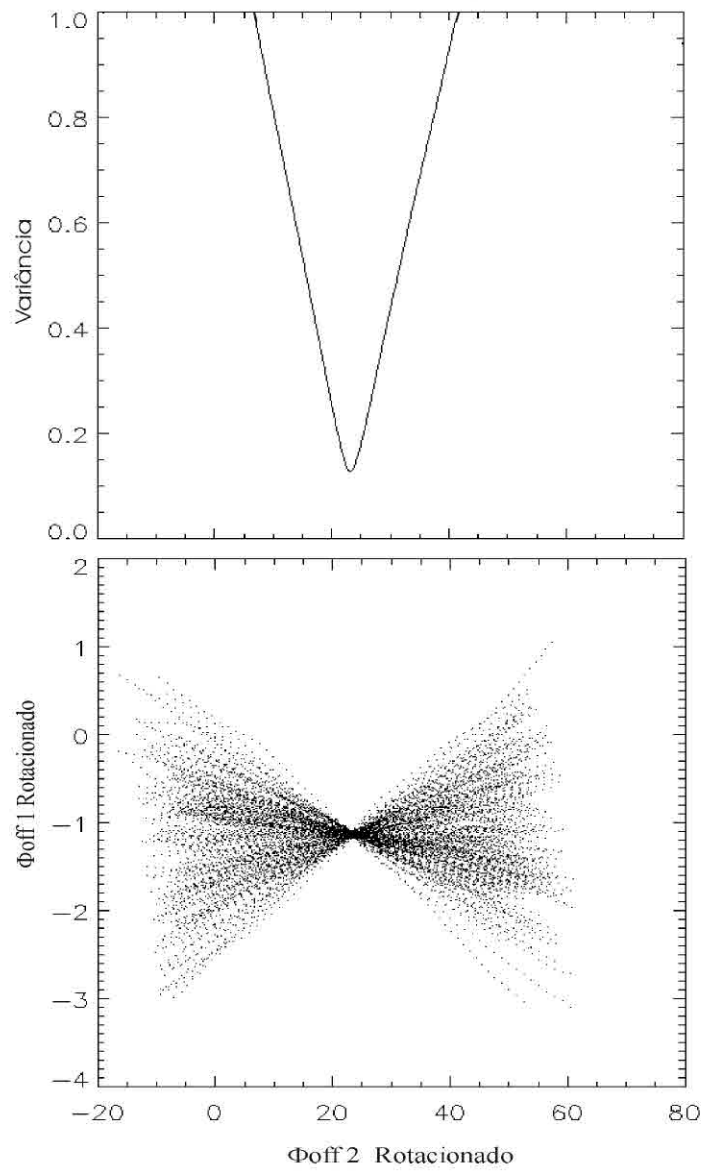


Fig. 3.9 – Ilustração da determinação da variância da família de funções rotacionadas.

Aplicando uma Transformação por Principais Componentes Inversa nos valores de $\hat{\phi}_{R\ off\ 1}$ e $\hat{\phi}_{R\ off\ 2}$, determina-se os “offset” de fase da primeira e segunda aquisição, $\hat{\phi}_{off\ 1}$ e $\hat{\phi}_{off\ 2}$.

3.4 Teste Comparativo entre os Métodos

Foram testados 10 pares de imagens, com uma porcentagem de sobreposição entre eles da ordem de 50%, com 3 diferentes características, ou seja, a primeira com um predomínio de área plana, a segunda caracterizada por uma mistura de área plana, morros e vegetação, e a terceira com predomínio de morros e vales. A Figura 3.10 ilustra as características dos três tipos de áreas testadas

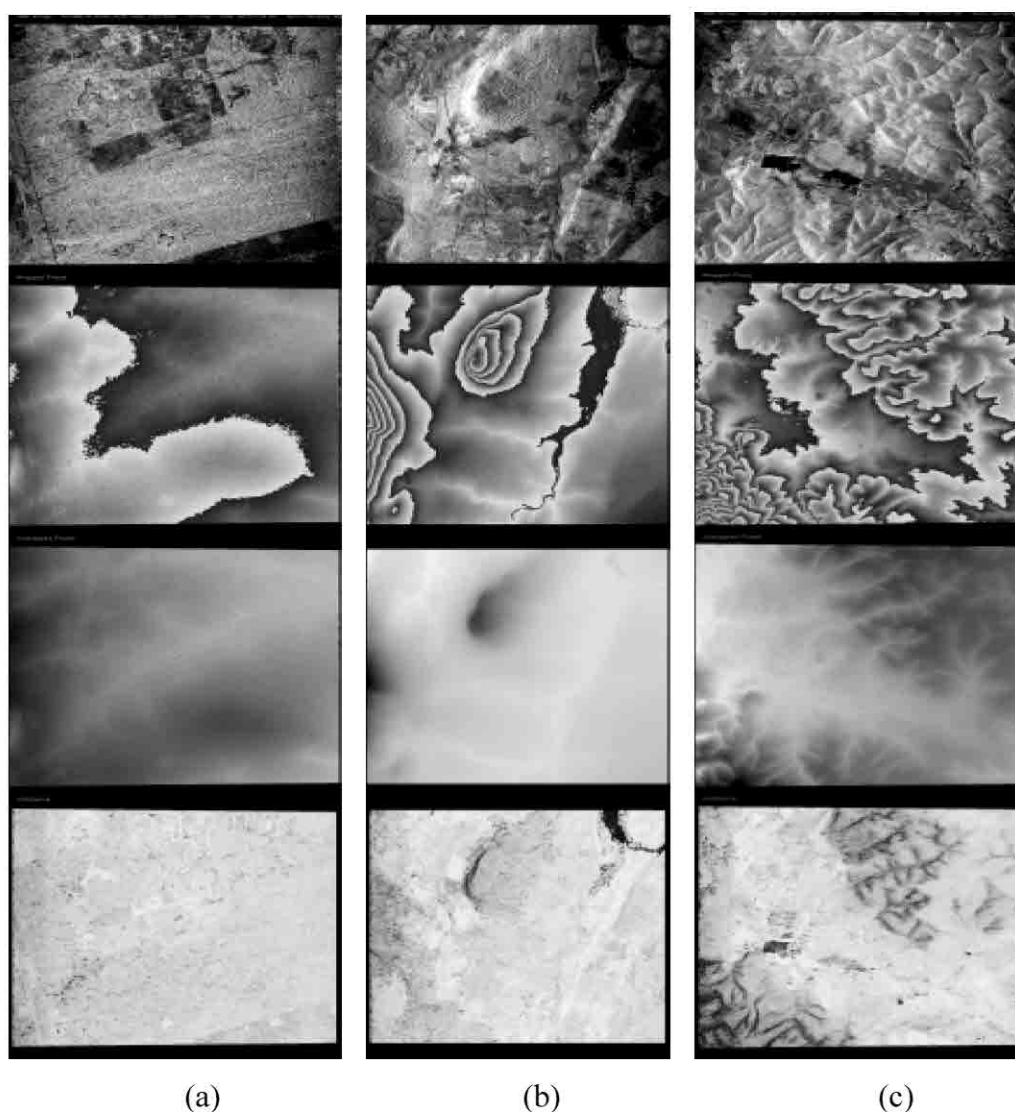


Fig. 3.10 - Tipos de áreas testadas (a) plana, (b) mista, (c) acidentada.

Obs: As imagens utilizadas são referentes ao Projeto de transposição de águas do Rio São Francisco, com as seguintes características: Imagem de 2 Km x 2 Km, resolução de 1.0 m, Banda X, modo interferométrico.

Cada coluna da Figura 3.10 representa um tipo de área, com as seguintes informações, na ordem de cima para baixo, a imagem SAR, o interferograma, fase interferométrica desdobrada e a imagem de coerência. Nota-se na área acidentada, o aparecimento de regiões escuras na imagem de coerência, devido a problemas de sombra e inversão (APÊNDICE A) e ruídos no interferograma, caracterizando regiões de baixa coerência, evitadas pelo algoritmo proposto.

TABELA 3.1 - TABELA COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE “OFFSET” DE FASE

Teste	Característica da área	Método				
		Ponto de controle “offset” (rd)	Minimização de função “offset” (rd)		Novo método “offset” (rd)	
		ima1 , ima2	ima1 , ima2	Tempo Proc. (min.)	ima1 , ima2	Tempo Proc. (min.)
1	plana	2.552 , ---	2.396 , 2.273 $\varepsilon_{MNT} = 0.731$ m	382	2.311 , 1.198 $\varepsilon_{MNT} = 0.735$ m	13
2	plana	2.552 , ---	2.706 , 2.582 $\varepsilon_{MNT} = 0.264$ m	335	2.716 , 2.582 $\varepsilon_{MNT} = 0.266$ m	14
3	plana	8.411 , ---	8.574 , 8.662 $\varepsilon_{MNT} = 0.278$ m	356	8.633 , 8.742 $\varepsilon_{MNT} = 0.290$ m	13
4	plana	8.286 , ---	8.110 , 1.996 $\varepsilon_{MNT} = 0.445$ m	407	8.121 , 2.032 $\varepsilon_{MNT} = 0.564$ m	14
5	mista	2.490 , ---	2.723 , 8.869 $\varepsilon_{MNT} = 0.351$ m	381	2.708 , 8.783 $\varepsilon_{MNT} = 0.352$ m	15
6	mista	-3.823 , ---	-3.542 , -3.486 $\varepsilon_{MNT} = 0.311$ m	254	-3.575 , -3.510 $\varepsilon_{MNT} = 0.311$ m	13
7	mista	2.103 , ---	1.855 , -10.806 $\varepsilon_{MNT} = 0.574$ m	309	1.846 , -10.854 $\varepsilon_{MNT} = 0.586$ m	15
8	mista	21.086 , ---	21.067 , 27.360 $\varepsilon_{MNT} = 0.346$ m	281	20.876 , 27.185 $\varepsilon_{MNT} = 0.370$ m	13
9	acidentada	8.484 , ---	8.716 , 2.355 $\varepsilon_{MNT} = 0.395$ m	242	8.676 , 2.278 $\varepsilon_{MNT} = 0.387$ m	15
10	acidentada	8.530 , ---	8.757 , 15.260 $\varepsilon_{MNT} = 0.454$ m	276	8.617 , 15.116 $\varepsilon_{MNT} = 0.399$ m	14

A Tabela 3.1 mostra os resultados dos “*offset*” de fase, em 10 diferentes áreas, utilizando os três métodos descritos. Os valores em negritos são correspondentes as imagens onde existem refletores de canto. Os tempos de processamento dos dois últimos métodos foram computados. A plataforma de processamento utilizada foi um PC com as seguintes características: 333 MHz de “*clock*”, 256 Mb de memória principal, e 9 Gb de memória em disco rígido, com sistema operacional LINUX versão 3.1, e linguagem IDL versão 5.2.

Nota-se a pouca diferença entre os valores de “*offset*” de fase obtidos pelo método de minimização de erro global e pelo novo método proposto. A Tabela 3.2 apresenta as diferenças dos “*offset*” de fase entre os três métodos descritos, para as 10 áreas testadas.

TABELA 3.2 - DIFERENÇAS DE “OFFSET” DE FASE ENTRE OS MÉTODOS

Teste	Característica da área	Diferença de “ <i>offset</i> ” de fase entre os Métodos		
		(<i>Ponto controle – Minim. de função</i>) (radianos)	(<i>Ponto controle – Novo método</i>) (radianos)	(<i>Minim. de função – Novo Método</i>) (radianos)
1	Plana	0.156	0.241	0.085
2	plana	-0.154	-0.164	-0.010
3	plana	-0.133	-0.222	-0.059
4	plana	0.176	0.165	-0.011
5	mista	-0.233	-0.218	0.015
6	mista	0.278	0.245	-0.033
7	mista	0.248	0.257	0.029
8	mista	0.019	0.210	0.191
9	acidentada	-0.232	-0.192	0.04
10	acidentada	-0.227	-0.087	0.140
$\Delta_{\phi_{rms}}$ (rd)		0.198	0.205	0.084

Nota-se na Tabela 3.1, que os valores de “*offset*” obtidos pelos dois últimos métodos, são praticamente iguais, mas com uma diferença de tempo de processamento da ordem de 20 vezes menor, para o novo método proposto.

Na Tabela 3.2, nota-se que o valor máximo das diferenças de “*offset*” é de 0.257 radianos e uma diferença quadrática média da ordem de 0.2 radianos, resultado este que se equipara ao método de minimização do erro global, em termos destas diferenças.

Outro tipo de teste realizado, foi o cálculo do “*offset*” de fase com diferentes graus de sobreposição entre as duas aquisições. Duas áreas testes foram utilizadas, a primeira com característica de superfície plana e a segunda de característica acidentada. A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 3.3 - CÁLCULO DOS “OFFSET” DE FASE COM DIFERENTES GRAUS DE SOBREPOSIÇÃO

Teste	Tipo de da área	Grau de sobreposição entre as duas aquisições			
		50%	40%	30%	20%
		“offset” (rd)	“offset” (rd)	“offset” (rd)	“offset” (rd)
		Ima1, I ma2	Ima1, Ima2	Ima1, Ima2	Ima1, Ima2
1	Plana	2.636, 2.482	2.673 , 2.547	2.644 , 2.548	2.710 , 2.609
		$\varepsilon_{MNT} = 0.267 \text{ m}$	$\varepsilon_{MNT} = 0.264 \text{ m}$	$\varepsilon_{MNT} = 0.266 \text{ m}$	$\varepsilon_{MNT} = 0.276 \text{ m}$
2	Aciden- tada	8.675, 15.103	8.573, 15.110	8.448, 14.998	8.258, 14.886
		$\varepsilon_{MNT} = 0.393 \text{ m}$	$\varepsilon_{MNT} = 0.408 \text{ m}$	$\varepsilon_{MNT} = 0.438 \text{ m}$	$\varepsilon_{MNT} = 0.573 \text{ m}$

Nota-se na Tabela 3.3, que foi possível calcular os “*offset*” de fase com todos os graus de sobreposição, contudo, para sobreposição menor que 40% na a área acidentada, o erro quadrático médio entre os MNT tende a aumentar, bem como a variação na diferença entre “*offset*” de fase, tomando como referência o “*offset*” de 50%.

O novo método de cálculo de “*offset*” de fase interferométrica, mostrou-se suficientemente robusto para qualquer tipo de área, quando a sobreposição é maior que 40%, o que normalmente ocorre em mapeamento sistemático.

3.4.1 Análise de Erros no MNT Devido a Erro no “Offset” de Fase

O erro no MNT, devido a diferença entre o “*offset*” de fase real, obtido através do uso de “*corner-reflector*”, e o “*offset*” de fase obtido através do novo método, pode ser analisado através da equação que relaciona o erro de fase, com o erro no modelo de elevação (APÊNDICE C), ou seja:

$$\sigma_z^\phi(m) = \frac{\lambda \cdot r \cdot \sin \theta}{4\pi B_n} \sigma_{\phi_{off}} \quad (3.26)$$

onde $\sigma_{\phi_{off}}$ representa o desvio no “*offset*” de fase, ‘r’ representa a distância entre a antena principal e um ponto genérico no solo, θ representa o ângulo entre o nadir e o vetor r, e B_n representa a linha-base normal, definida pela seguinte equação:

$$B_n = B_h \cos \theta + B_v \sin \theta \quad (3.27)$$

onde B_h representa a linha-base horizontal, e B_v a linha-base vertical.

As imagens utilizadas nos testes, foram adquiridas segundo a geometria ilustrada na Figura 3.11, com os seguintes valores nominais:

- Altura de vôo média em relação ao solo: $H = 3500\text{m}$
- Faixa imageada no solo: $\text{Faixa} = 2000\text{ m}$
- Variação do ângulo θ : 29° a 50°
- Variação da distância “r”: $r = H/\cos\theta$
- Linha-base horizontal: $B_h = 2.3655\text{ m}$
- Linha-base vertical: $B_v = 0.3150\text{ m}$

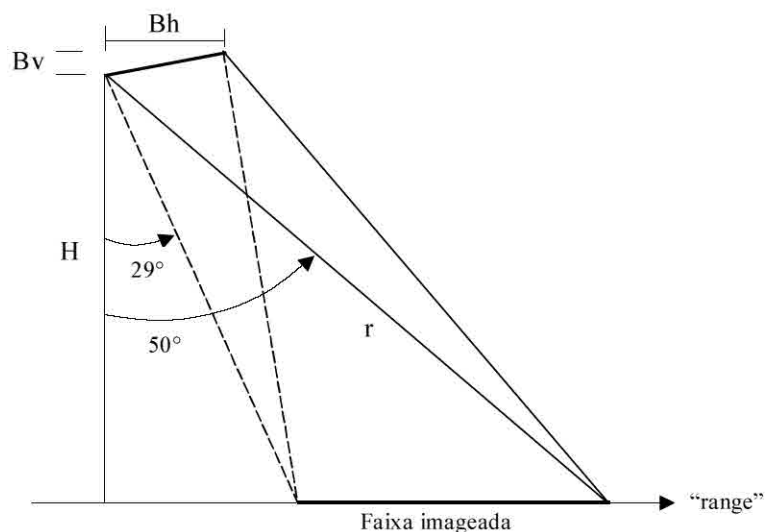


Fig. 3.11 – Geometria de aquisição das imagens de teste.

Nota-se nas Equações 3.22 e 3.23, que para um dado desvio no “*offset*” de fase, o desvio no modelo de elevação varia através da largura da faixa de vôo, introduzindo um erro no MNT na direção perpendicular ao vôo. A Figura 3.12 ilustra esta variação no modelo de elevação, para diversos valores de desvio no “*offset*” de fase, de acordo com a geometria utilizada nas imagens de teste.

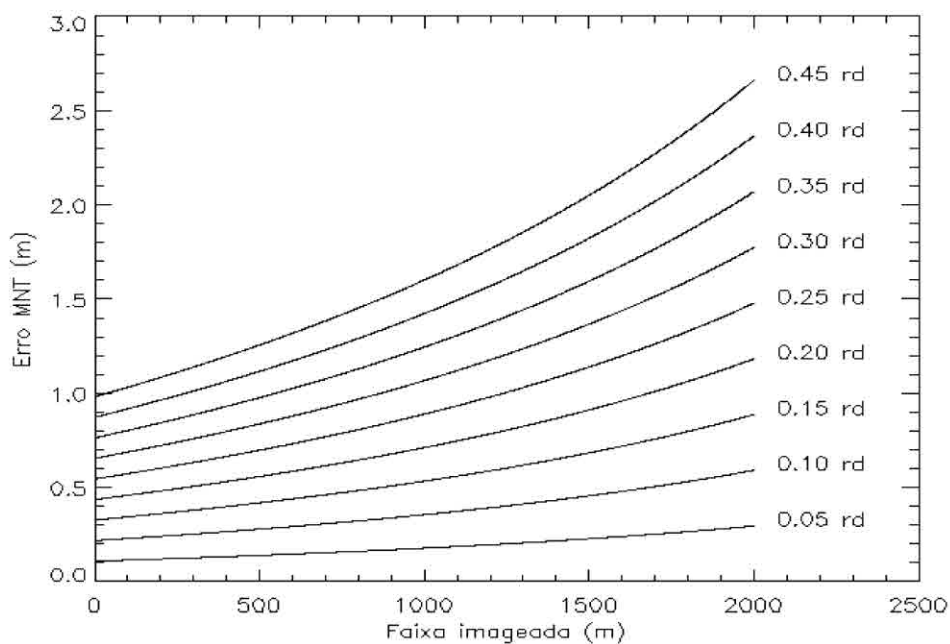


Fig. 3.12 – Desvios nos valores do modelo de elevação.

A Tabela 3.4 ilustra o erro quadrático médio no modelo de elevação, para os diversos valores de desvio no “*offset*” de fase.

TABELA 3.4 - ERRO QUADRÁTICO MÉDIO NO MODELO DE ELEVAÇÃO

$\Delta_{\phi} (rd)$	0,04	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
$e_{MNT_{rms}} (m)$	0,193	0,386	0,579	0,772	0,965	1,188	1,352	1,545	1,738

Segundo a Tabela 3.2, o desvio máximo encontrado nos 10 teste realizados, foi de 0.257 radianos para o novo método, e um valor quadrático médio de 0.2 radianos. Estes desvios provocariam um erro quadrático médio no MNT menor que 1.0 metro, segundo a Tabela 3.4.

Com este valor de erro no MNT, é possível utilizá-lo na geração de cartas topográficas, com uma equidistância entre as curvas de nível de até 2.0 metros, ou seja, para cartas na escala de 1:5000, pois neste caso o erro admitido seria de até meia equidistância, ou seja, erro de até 1.0 metro na altimetria.

Pode-se concluir então, que o método de calibração de fase interferométrica proposto, pode ser utilizado para a geração de produtos cartográficos na escala igual e inferior a 1:5000, quando a geometria de aquisição das imagens assim o permitir.

O novo método de calibração de fase, se mostrou bastante rápido, robusto e sem a necessidade de nenhuma intervenção do operador, o que faz este método, apropriado para um processo de geocodificação automática de imagens SAR interferométricas.

CAPÍTULO 4

GEOCODIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS InSAR

O processo de geração de produtos cartográficos por interferometria SAR, passa por várias etapas de processamento, que vão desde a geração da imagem SAR, geração do interferograma, geração da imagem de coerência, desdobramento de fase, calibração de fase, geração de MNT, geração de orto-imagem SAR, geração de mapa de resolução, mosaicagem das orto-imagens SAR e dos MNTs, até a geração das curvas de nível para a produção da orto-imagem carta.

4.1 Geocodificação Automática Proposta

As 4 primeiras etapas de processamento são realizadas automaticamente através do processo chamado de *Processamento SAR Interferométrico*.

A proposta deste trabalho, é a de realizar automaticamente as outras 7 etapas finais do processamento:

- A calibração de fase e determinação da fase interferométrica absoluta.
- A geração do MNT.
- A geração da orto-imagem SAR.
- A geração do mapa de resolução.
- A mosaicagem das orto-imagens SAR.
- A mosaicagem dos MNTs.
- A geração das curvas de níveis a partir do MNT da carta.

O processamento automático destas etapas será chamado neste trabalho de *Geocodificação InSAR*.

A proposta de geocodificação InSAR, é baseada no uso de imagens SAR interferométricas, onde já se conhece ‘a priori’, as coordenadas geográficas dos 4 cantos de cada imagem a ser utilizada.

Estas características são geralmente encontradas em imagens de radar aerotransportados, em que durante o processo de aquisição das imagens coletou-se também dados do sistema de navegação inercial, INS, e de sistema DGPS, para garantir um exato geo-referenciamento das imagens (Barmetler et al., 1998).

A Figura 4.1 ilustra o fluxo do processamento do processo automático de geocodificação InSAR proposto, denominado de sistema Geo-InSAR. A etapa de edição não é abordada neste trabalho.

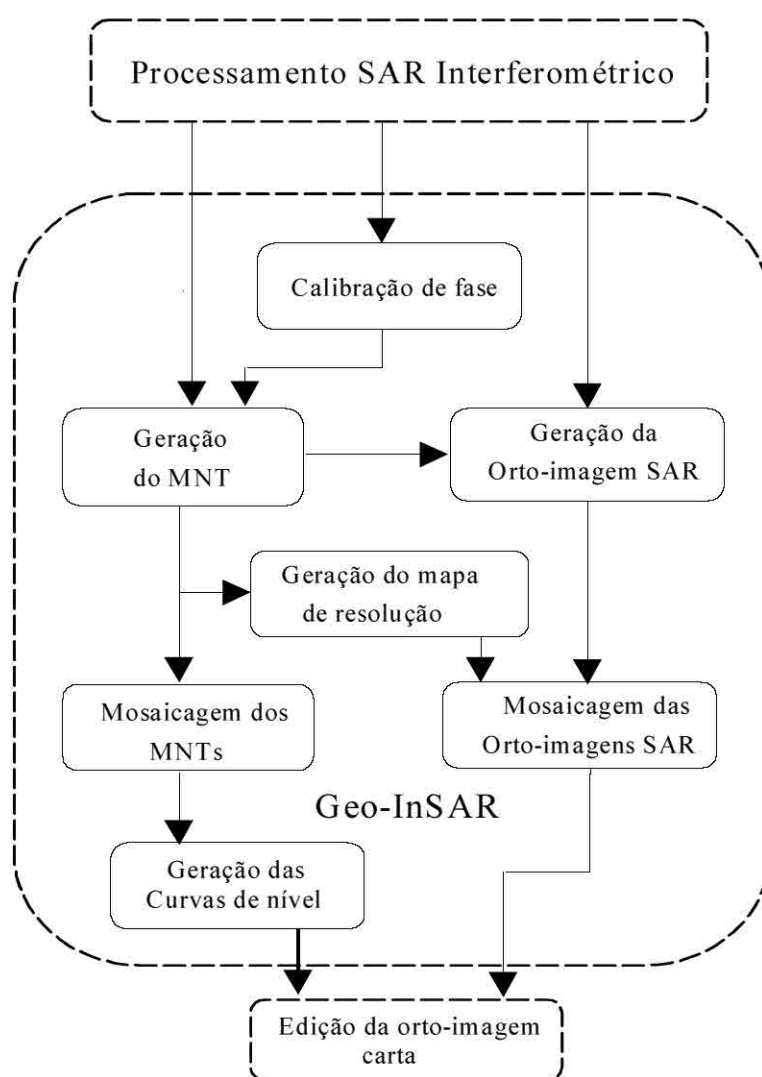


Fig. 4.1 - Fluxo de processamento para geração de orto-imagem carta.

4.1.1 Calibração de Fase

A etapa de calibração de fase, onde está a maior contribuição desta tese, ou seja, a etapa onde se determina o “*offset*” de fase, para a geração da fase interferométrica absoluta, é uma das etapas mais críticas da geocodificação automática. A exatidão altimétrica do MNT de uma carta, depende da exata calibração das fases desdobradas, contidas no mosaico de uma carta.

Geralmente uma orto-imagem carta é composta de várias imagens SAR. A quantidade de imagens envolvidas depende da largura da faixa de vôo do radar e também da escala em que se deseja gerar a carta. Para cada imagem SAR interferométrica envolvida, tem-se a respectiva fase desdobrada, com “*offset*” de fase desconhecido.

A etapa de calibração de fase, envolve a determinação dos valores de “*offset*” de cada imagem presente na carta, para isso, definiu-se o seguinte procedimento:

- 1) *Verifica a existência de pontos de controle na área envolvida pela carta, ou seja, a presença de “corner-reflector” em alguma das imagens presentes na carta.*
- 2a) *Caso positivo: Determina-se o “offset” de fase, utilizando o ponto de controle, por um processo de geocodificação SAR inversa.*
- 2b) *Caso negativo: Determina-se o “offset” de fase, utilizando o novo método de calibração de fase, no par de imagens mais próximas do centro da carta, que atenda as condições descritas no item 3.3.1.*
- 3) *Gera-se o MNT da imagem, no caso (a) ou das imagens no caso (b).*
- 4) *Determina-se os “offset” de fase das imagens vizinhas, caso haja sobreposição, através do MNT gerado no item (3), utilizando o processo de geocodificação SAR inversa.*

A Figura 4.2 ilustra o fluxo de processamento, para a determinação dos valores de “*offset*” de fase das imagens presente na carta. Como pode ser visto no fluxograma, determina-se primeiramente as regiões de sobreposição entre as imagens, em seguida relaciona os pares de imagens, onde a geometria de aquisição acorda com o da Figura 3.2, ou seja, na direção perpendicular ao vôo, “*cross track*”, e também relaciona-se os pares de imagens com sobreposição no sentido de vôo, “*along track*”.

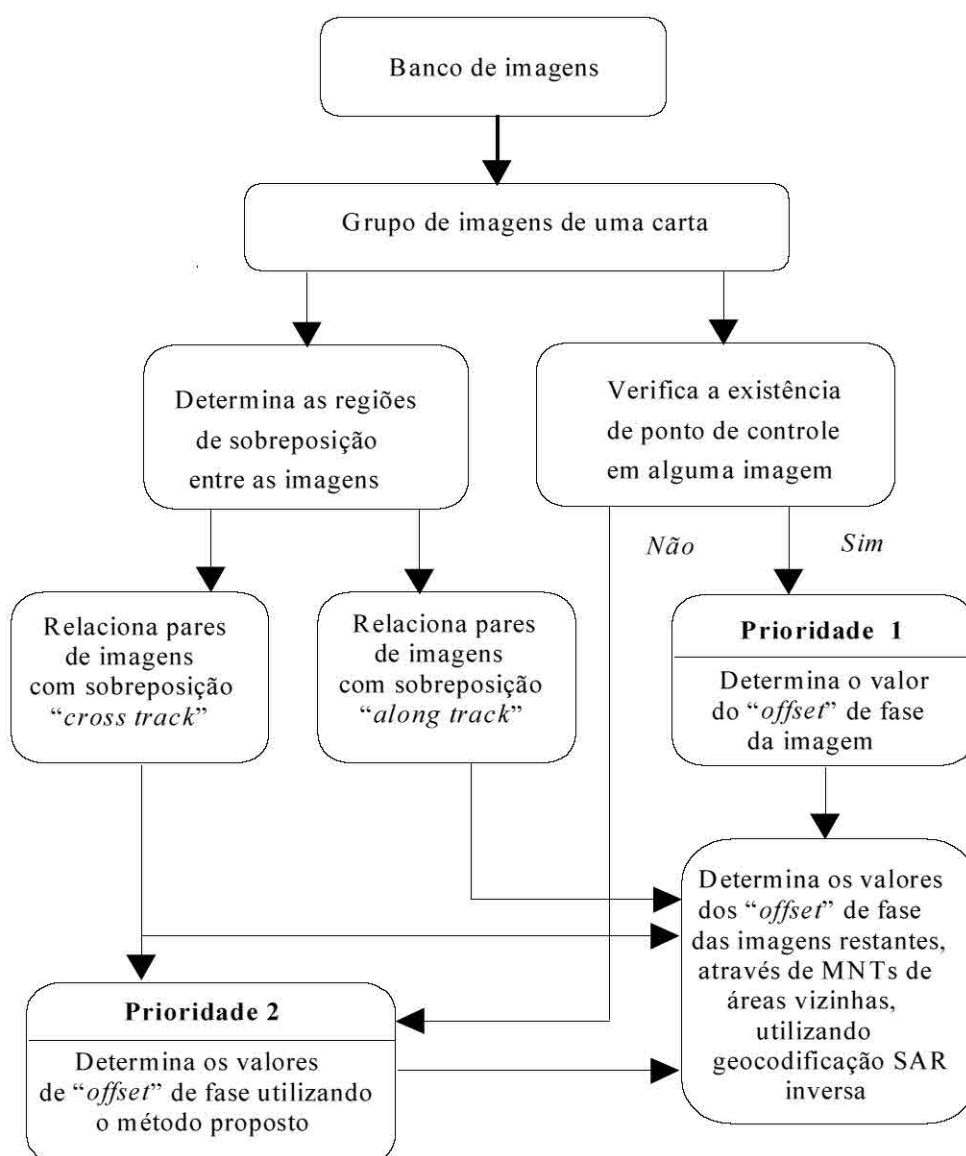


Fig. 4.2 - Fluxo de processamento para calibração de fase.

4.1.2 Geração de Modelo Numérico de Terreno

A geração de MNT a partir de dados SAR interferométricos, passa primeiramente pela determinação das coordenadas cartesianas de cada ponto da imagem SAR, através da solução do sistema de equações não lineares, representado pelas equações 2.22, 2.23, 2.24 e 2.25, onde se utiliza o valor da fase interferométrica absoluta, para o exato posicionamento de cada ponto, neste sistema de coordenadas.

No processo de geração do MNT, a verificação do nível de coerência, descrito na seção 2.2.4, é muito importante, pois um nível baixo indica que a fase interferométrica neste local não é confiável, evitando-se com isso que se calcule valores errados de elevação.

Normalmente os pontos de baixa coerência, são caracterizados por regiões onde existe a presença de água, lagos, rios, etc., e também em regiões de sombra e inversão nas imagens SAR (APÊNDICE A). Com isso, os valores de elevação são calculados apenas em regiões onde o nível de coerência está acima de um certo limiar aceitável, cujo valor determinado experimentalmente foi de 0.5, dentro de uma faixa variando entre 0 e 1.

A elevação de um ponto genérico $P(x,y,z)$, no sistema de coordenadas cartesianas, está ligada a uma referência. Para que este ponto tenha um valor de elevação, ou seja, uma altura em relação a uma referência, ele sofre várias transformações de sistemas de coordenadas.

A primeira transformação de $P(x,y,z)$, para que seja dado a ele um valor de altura, é a transformação de mudança de coordenadas, de cartesianas para geográficas, utilizando as equações de Helmert (Frei et al., 1993), onde é dado ao ponto um valor de elevação em relação a um elipsóide de referência, como ilustrado na Figura 4.3.

Nesta primeira transformação utiliza-se um elipsóide de referência global, o WGS84 por exemplo, que é uma representação matemática da superfície da Terra. A representação de um ponto genérico, no novo sistema de coordenadas, $P(\lambda, \phi, h_e)$, é dado pela longitude do ponto, λ , latitude do ponto, ϕ , e altura do ponto, h_e , em relação ao elipsóide de referência WGS84.

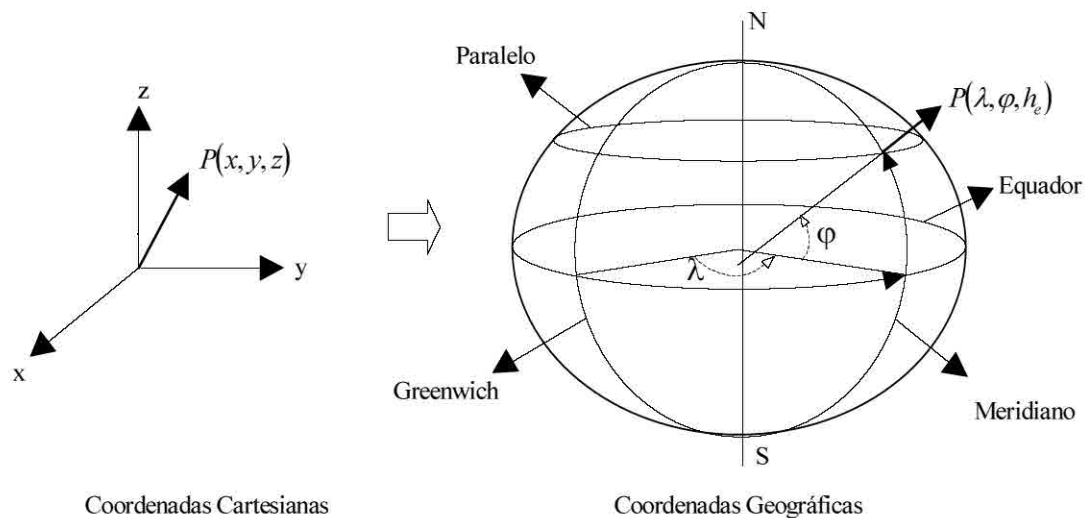


Fig. 4.3 - Transformações Cartográficas

FONTE: Schreier (1993).

A representação da forma da Terra por um elipsóide global, é uma representação aproximada. A melhor representação da forma da Terra, é modelada pelo nível médio dos oceanos, chamado de geóide, que representa uma superfície equipotencial correspondente a uma elevação absoluta de zero metros (Schreier, 1993). O potencial gravitacional em qualquer ponto sobre o geóide deve ser o mesmo, e a direção da gravidade é sempre perpendicular ao geóide.

Como o elipsóide global não casa muito bem com o geóide, devido a variação da densidade da Terra, utiliza-se normalmente elipsóides locais, e pontos de origem chamados de datum, para que haja uma melhor representação matemática da superfície da Terra, no local onde se deseja fazer o mapeamento. A Figura 4.4 ilustra o geóide e elipsóides.

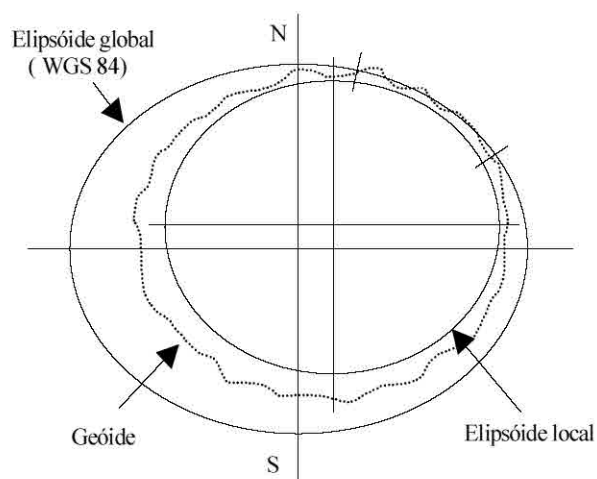


Fig. 4.4 – Representação do geóide e de elipsóides.

FONTE: Schreier (1993)

Na segunda transformação, cada ponto genérico $P(\lambda, \varphi, h_e)$ é transformado em $P(\lambda', \varphi', h_{el})$, com novos valores de longitude, latitude e altura elipsoidal, em relação ao elipsóide local. Esta segunda transformação é realizada, utilizando as equações de Bursa-Wolf (Frei et al., 1993).

Após a segunda transformação, a elevação de um ponto genérico, $P(\lambda', \varphi', h_{el})$, está relacionada ao elipsóide local, a um datum planimétrico (SAD69 por exemplo) e a um datum altimétrico (Imbituba por exemplo).

A altura ortométrica é a melhor representação da elevação de um ponto, ao invés da altura elipsoidal, pois o geóide garante fisicamente que superfícies de água sejam representadas por níveis horizontais. Para isso, uma terceira transformação é realizada nos valores de elevação, ilustrado na Figura 4.5, ou seja, para cada ponto genérico $P(\lambda', \varphi', h_{el})$ calcula-se a nova altura do ponto em relação ao geóide:

$$h_{map} = h_{el} - O_g \quad (4.1)$$

onde O_g representa o valor da ondulação geoidal, no ponto em questão.

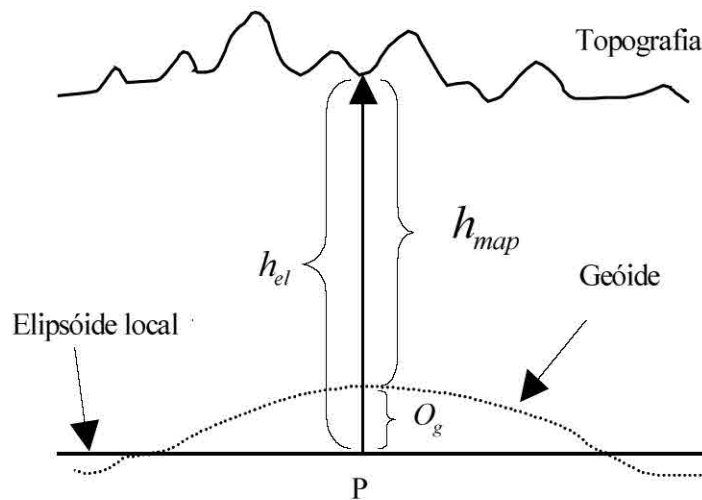


Figura 4.5 – ilustração de altura elipsoidal e altura geoidal.

FONTE: Schreier (1993)

A última transformação que o MNT sofre, para que seja gerada uma carta topográfica, é a transformação de projeção. Diversas projeções têm sido propostas, para que a superfície da Terra seja representada por uma superfície plana, tais como: UTM, Lambert, Esteroscópica, etc. (Oliveira, 1988).

No Brasil, utiliza-se normalmente o sistema de projeção UTM, com datum planimétrico SAD 69 e elipsóide de referência 67, e datum altimétrico de Imbituba, definido pelo marégrafo situado em Imbituba.

A Figura 4.6 ilustra o MNT geo-referenciado na projeção UTM, datum planimétrico SAD 69 e datum altimétrico de Imbituba, gerado a partir das imagens e interferograma ilustrado na Figura 2.7.

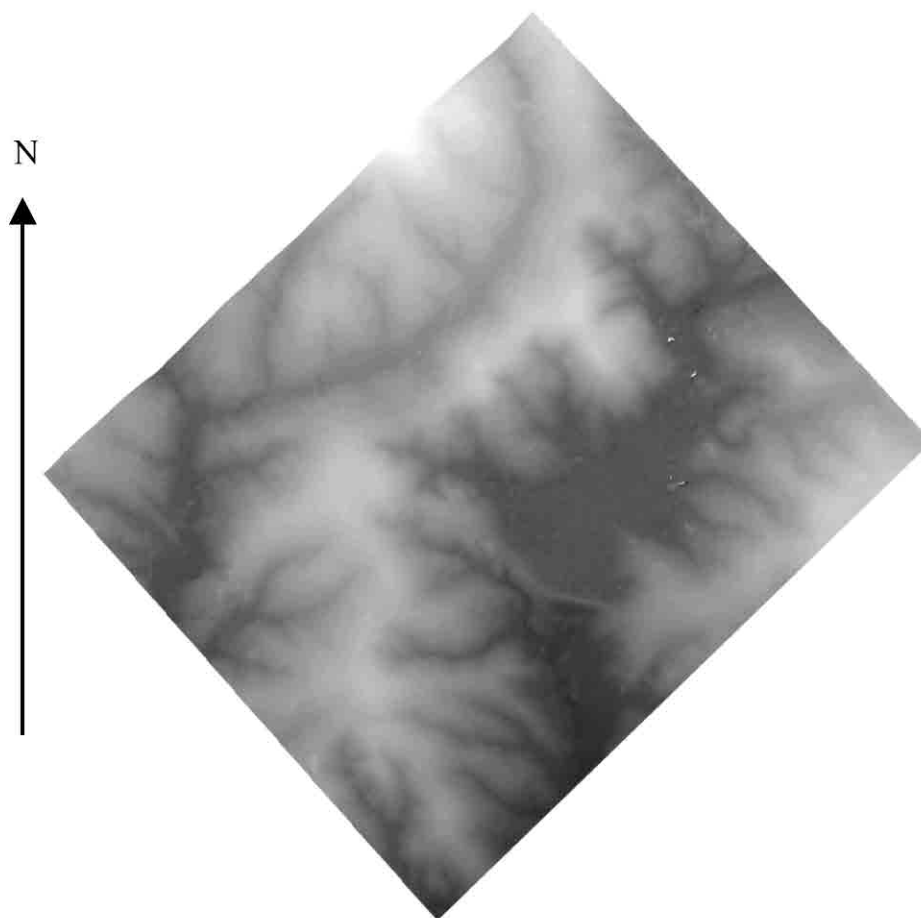


Fig. 4.6 – Ilustração de um MNT geo-referenciado, obtido por Interferometria SAR.

4.1.3 Geração de Mapa de Resolução

A radiometria do radar sofre bastante influência da topografia do terreno, principalmente devido à geometria de visada lateral utilizada. A variação de brilho na imagem SAR, depende do ângulo de incidência em que a frente de onda do radar atinge a superfície.

O sinal de retorno depende fortemente do ângulo de incidência local, ou seja, do ângulo em que a direção da frente de onda faz com a normal da superfície, como ilustrado na Figura 4.7.

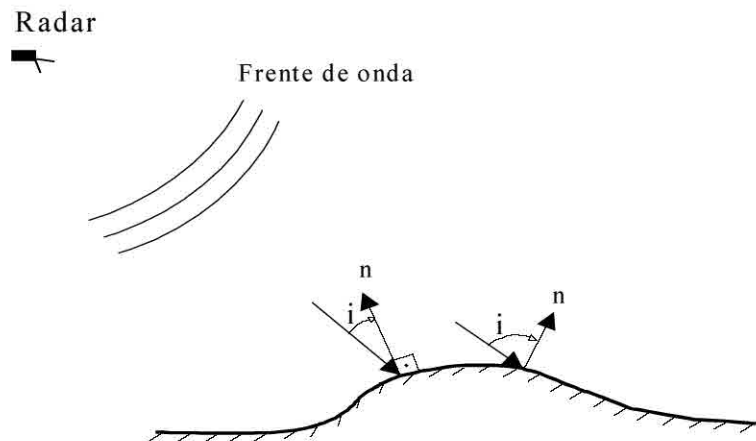


Fig. 4.7 – Ilustração de ângulo de incidência local.

Quando o ângulo de incidência local for muito pequeno, tem-se um brilho intenso na imagem SAR, pois a resolução espacial local é maior, retornando com isso mais energia para o radar. Esta situação é encontrada em áreas bem próximas das regiões de inversão (APÊNDICE A).

Esta situação se inverte quando o ângulo for muito grande, pois neste caso, a resolução espacial local é menor, retornando com isso menos energia para o radar, produzindo um baixo brilho na imagem SAR. Esta situação é encontrada em áreas bem próximas das regiões de sombra.

O mapa de resolução espacial local, fornece valores que estão relacionados com a energia de retorno para o radar, onde a resolução espacial é calculada a partir das derivadas locais do MNT (APÊNDICE F), nas direções de “range” e azimuth.

Durante o processo de mosaicagem das orto-imagens SAR, os mapas de resolução podem ser utilizados, para que o efeito da topografia na radiometria seja minimizado. A Figura 4.8 ilustra um mapa de resolução extraído do MNT da Figura 4.6.

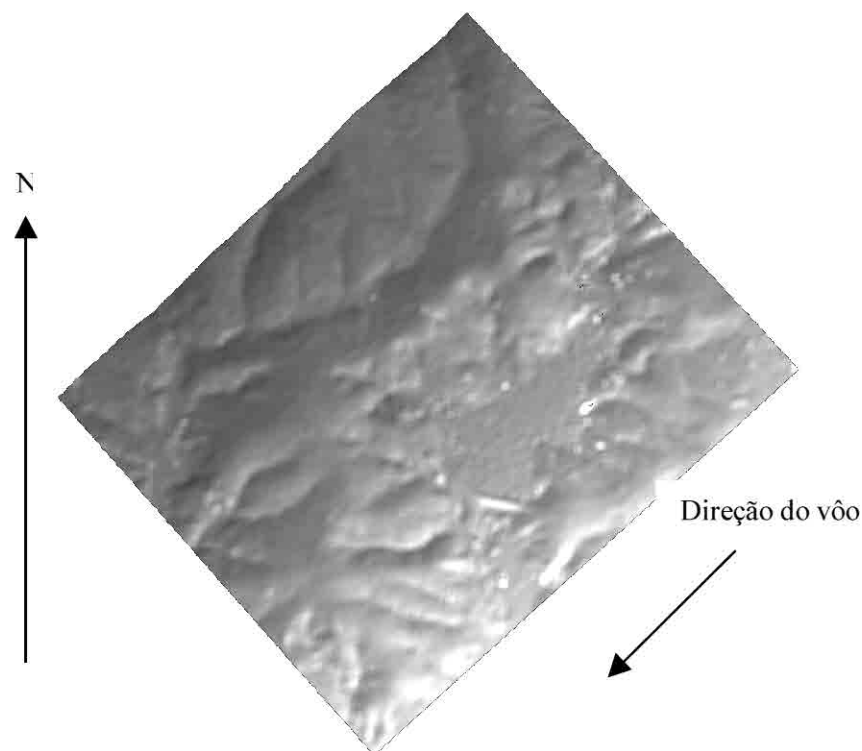


Fig. 4.8 - Ilustração de um mapa de resolução.

4.1.4 Geração de Orto-imagem SAR

O processo de geração de orto-imagem SAR, caminha em paralelo com o do MNT, ou seja, no caso de um ponto genérico $P(x,y,z)$, no sistema de coordenadas cartesiano, é dado a ele um valor de radiância, vindo da imagem SAR, da mesma posição de linha e coluna da fase interferométrica absoluta.

Após a primeira transformação, o valor de radiância do ponto $P(x,y,z)$ é projetado sobre o elipsóide de referência, como ilustrado na Figura 4.3, na coordenada geográfica (λ,φ) , ou seja, longitude e latitude do ponto.

Na segunda transformação, utilizando-se as equações de Bursa-Wolf (Frei et al., 1993), a radiância do ponto é projetada sobre o elipsóide local, referenciado a um datum planimétrico, reposicionando o ponto genérico $P(\lambda,\varphi)$ para uma nova coordenada (λ',φ') .

Para que a orto-imagem seja representada em forma de carta, todos os pontos de uma orto-imagem, devem ser reposicionados para um sistema de projeção, UTM e datum planimétrico SAD 69, por exemplo. No processo de reposicionamento para uma grade regular, utiliza-se uma interpolação bilinear.

Normalmente os valores de radiância de uma imagem SAR, sofrem variações de baixa frequência na direção de “*range*”, causados principalmente pela perda de potência relacionada a geometria de aquisição, visada lateral. Para que estas variações no brilho sejam minizadas nas orto-imagens, as imagens SAR sofrem uma correção radiométrica, conhecida como *correção de padrão de antena* (APÊNDICE G), antes do geo-referenciamento.

A Figura 4.9 ilustra a orto-imagem SAR geo-referenciada, na projeção UTM e datum planimétrico SAD 69, gerada a partir da imagem 1 da Figura 2.7, com padrão de antena corrigido.

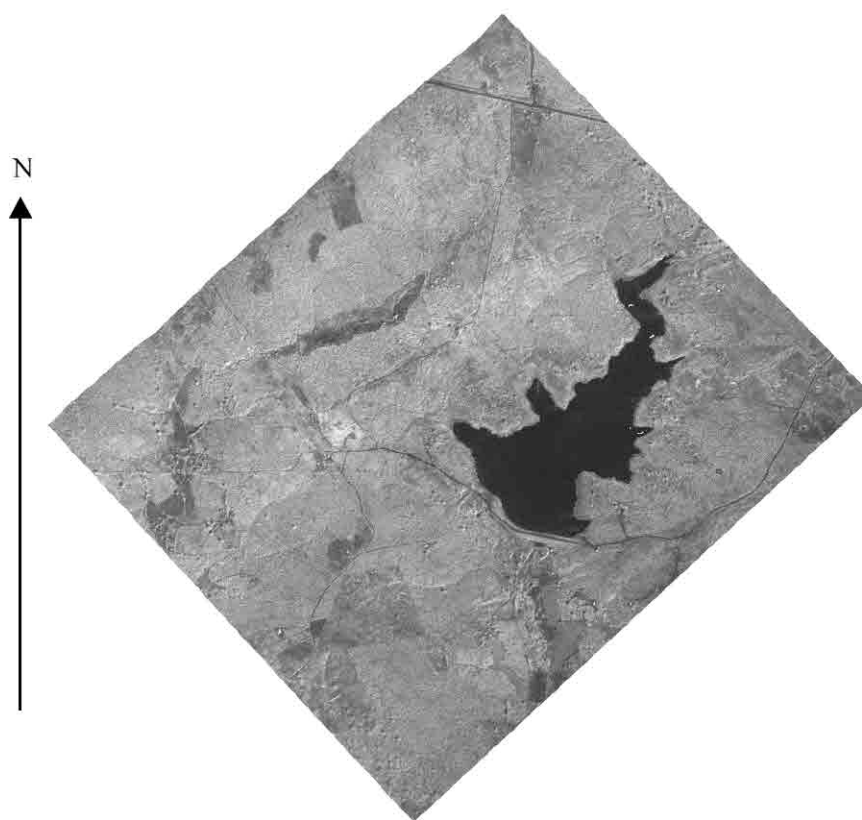


Fig. 4.9 - Ilustração de uma orto-imagem SAR geo-referenciada.

4.1.5 Mosaicagem de MNTs

A quinta etapa da geocodificação automática InSAR, é a geração de mosaico dos Modelos Numéricos de Terreno, para a confecção de uma carta topográfica. Esta etapa consiste basicamente da junção e fusão dos MNTs.

Como a proposta da geodificação automática InSAR está baseada no uso de imagens SAR interferométricas, onde já se conhece a priori as coordenadas geográficas nos 4 cantos de cada imagem, o processo de junção dos MNTs torna-se relativamente simples.

O processo de mosaicagem consiste basicamente em dispor cada MNT, segundo as suas coordenadas geográficas, na área delimitada pelas coordenadas da carta. Nas regiões onde existem as sobreposições de MNTs, normalmente calcula-se o valor médio dos MNTs, em cada ponto desta região.

4.1.6 Mosaicagem de Orto-imagens SAR

A última etapa da geocodificação automática InSAR consiste da mosaicagem das orto-imagens SAR. Como a priori se conhece as coordenadas geográficas nos 4 cantos de cada imagem, o processo de mosaicagem consiste basicamente em dispor cada orto-imagem, segundo as suas coordenadas geográficas, na área delimitada pelas coordenadas da carta.

Nas regiões onde existem sobreposições de orto-imagens, o processo da mosaicagem utiliza o mapa de resolução, para seleccionar a orto-imagem de referência, ou seja, de qual orto-imagem se toma o valor de radiância para o mosaico.

O algoritmo para esta tomada de decisão, está baseado no valor médio da resolução espacial local, ou seja, o valor de radiância correspondente ao valor de resolução mais próximo do valor médio, é atribuído ao mosaico. Este procedimento visa a minimização do efeito da topografia na radiometria.

4.1.7 Geração de Curvas de Nível

Para que o MNT de uma carta possa ser representado ele é colocado na forma de curvas de nível, obtidas através de um processo de fatiamento do MNT, em intervalos definidos pela escala da carta.

As curvas de nível podem ser sobrepostas à orto-imagem SAR, para formar uma orto-imagem carta, como pode ser visto na Figura 4.10.

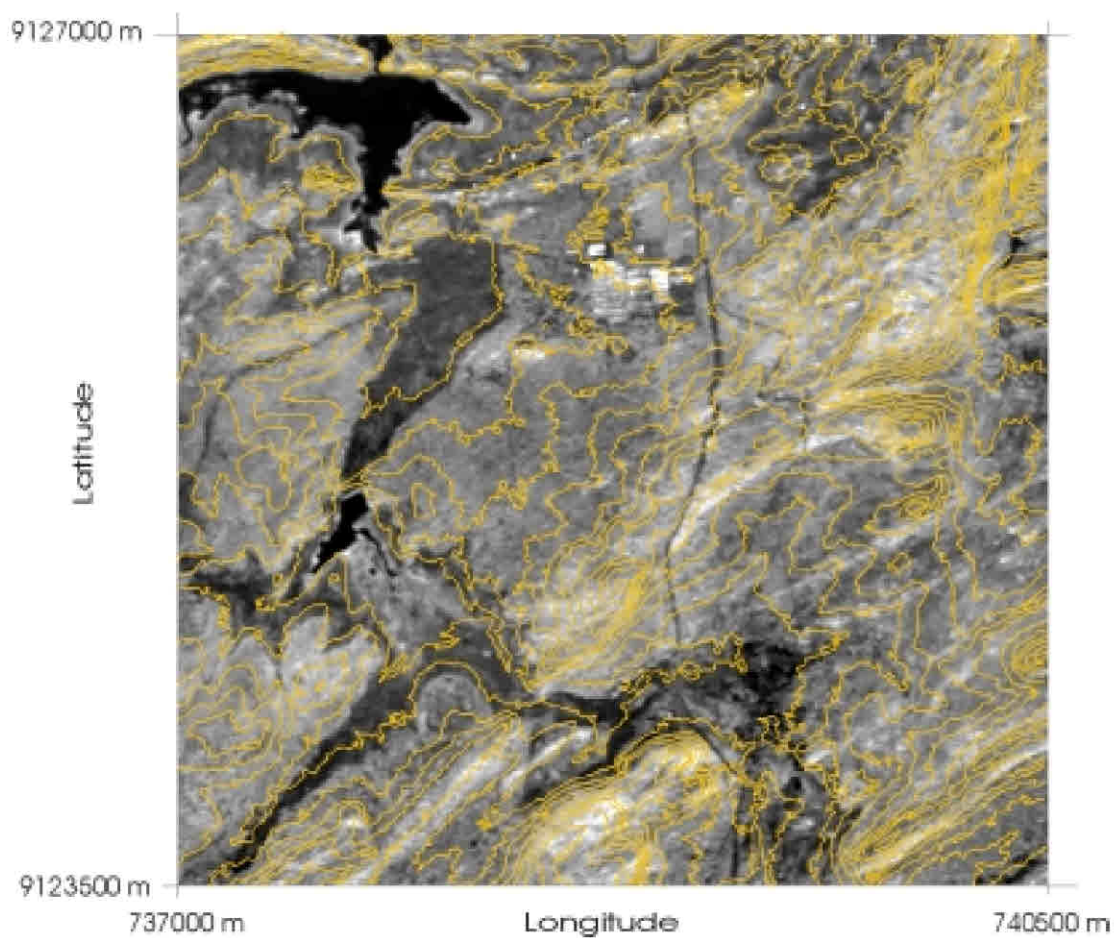


Fig. 4.10 - Ilustração de uma orto-imagem carta.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O experimento realizado para a avaliação do processo automático de Geocodificação de imagens SAR interferométricas, baseou-se na geração de um conjunto de orto-imagens carta, a partir de imagens SAR e interferogramas com resolução espacial de 1m x 1m metros, possibilitando a geração de cartas na escala igual e inferiores a 1:5000. Foram geradas várias orto-imagens cartas, cobrindo uma área retangular conforme ilustrado na Figura 5.1. As duas cartas nas extremidades do retângulo, ou seja, a carta 1_1 e a carta 1_5, possuem pontos de controle ou “*corner-reflectors*”. Cada carta gerada cobriu uma área nominal de 3500 Km x 3500 Km.

O propósito do primeiro experimento, foi verificar o desempenho do processo automático de geocodificação InSAR, descrito no Capítulo 4, utilizando o novo método de calibração de fase desenvolvido nesta tese, no Capítulo 3. Também determinou-se as diferenças entre os MNTs das cartas geradas, com o intuito de verificar possíveis propagações de erros entre eles. Para que as diferenças entre as cartas fossem computadas, cada carta possui uma área de sobreposição com as cartas vizinhas.

Um segundo experimento do processo automático de Geocodificação InSAR foi realizado, utilizando-se o método de calibração de fase baseado em minimização de função. O intuito dos dois experimentos foi de comparar os tempos de processamento, e as diferenças entre as cartas, para os dois métodos de calibração de fase.

A Figura 5.2 ilustra a orto-imagem SAR e o MNT da carta 2_4, correspondentes ao primeiro experimento. A Figura 5.3 ilustra duas possibilidades de representação de uma orto-imagem carta, tomado como exemplo a carta 2_4. A Figura 5.3 (a) ilustra uma carta hipsométrica, onde a altimetria é colocada sob a forma de cores, e a Figura 5.3 (b) uma orto-imagem carta, com a altimetria representada sob a forma de curvas de nível.

A Figura 5.4 ilustra o mosaico de orto-imagens SAR e a Figura 5.5 o mosaico de MNTs, correspondentes às cartas geradas da área teste, no primeiro experimento.

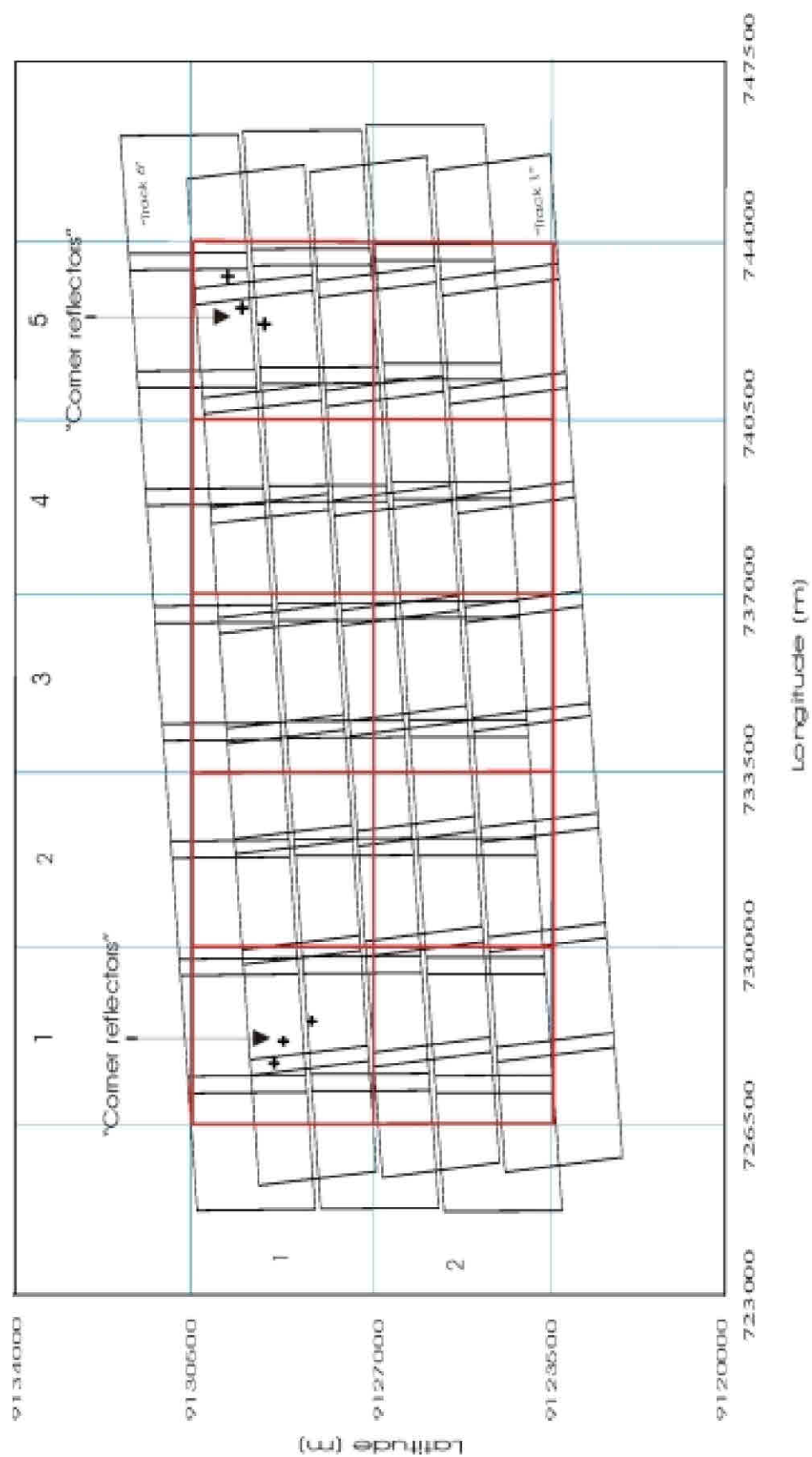


Figura 5.1 - Área de teste

...

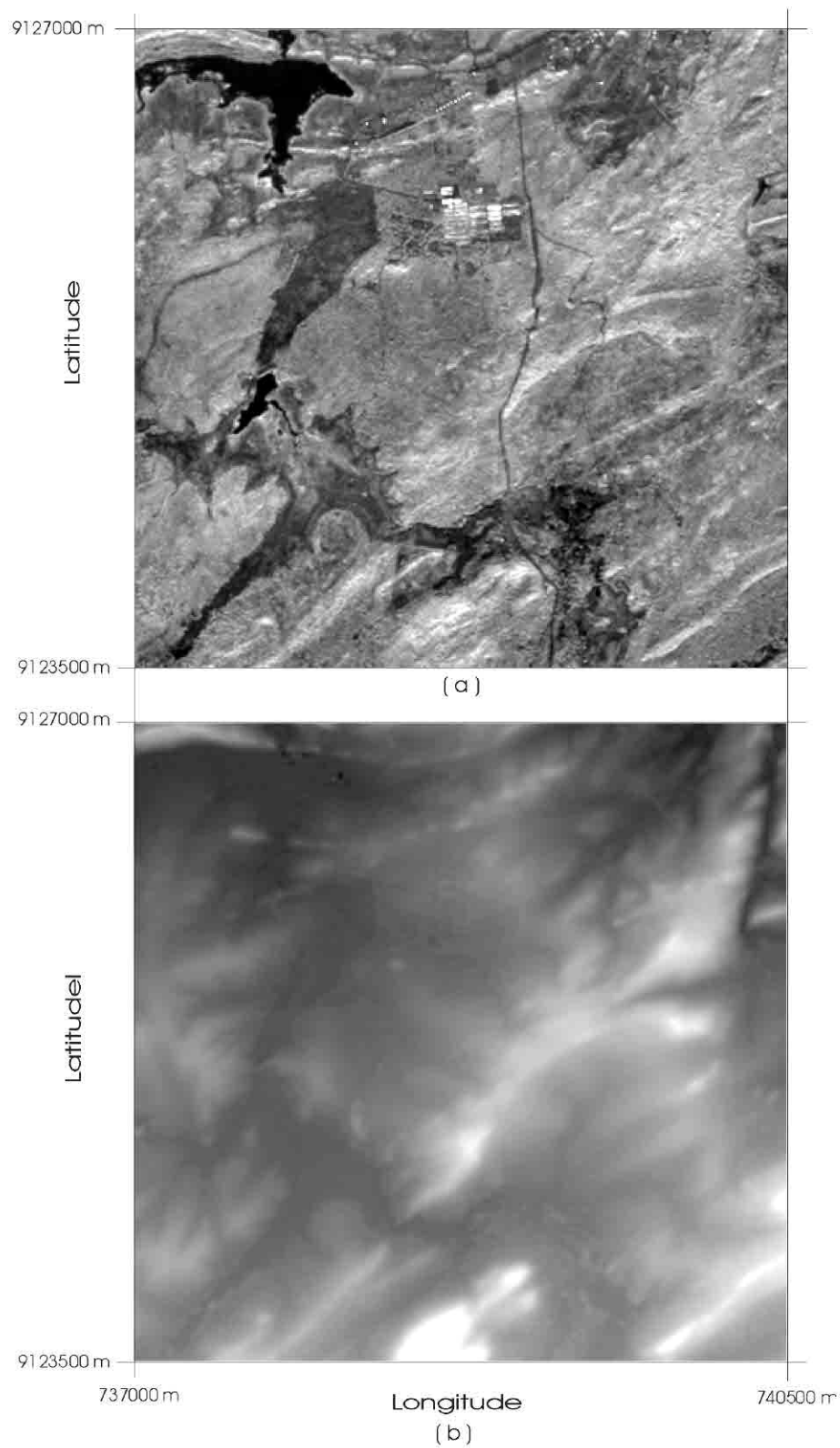


Fig. 5.2 - Ilustração da Orto-imagem SAR (a) e do MNT (b) da carta 2-4 da área teste.

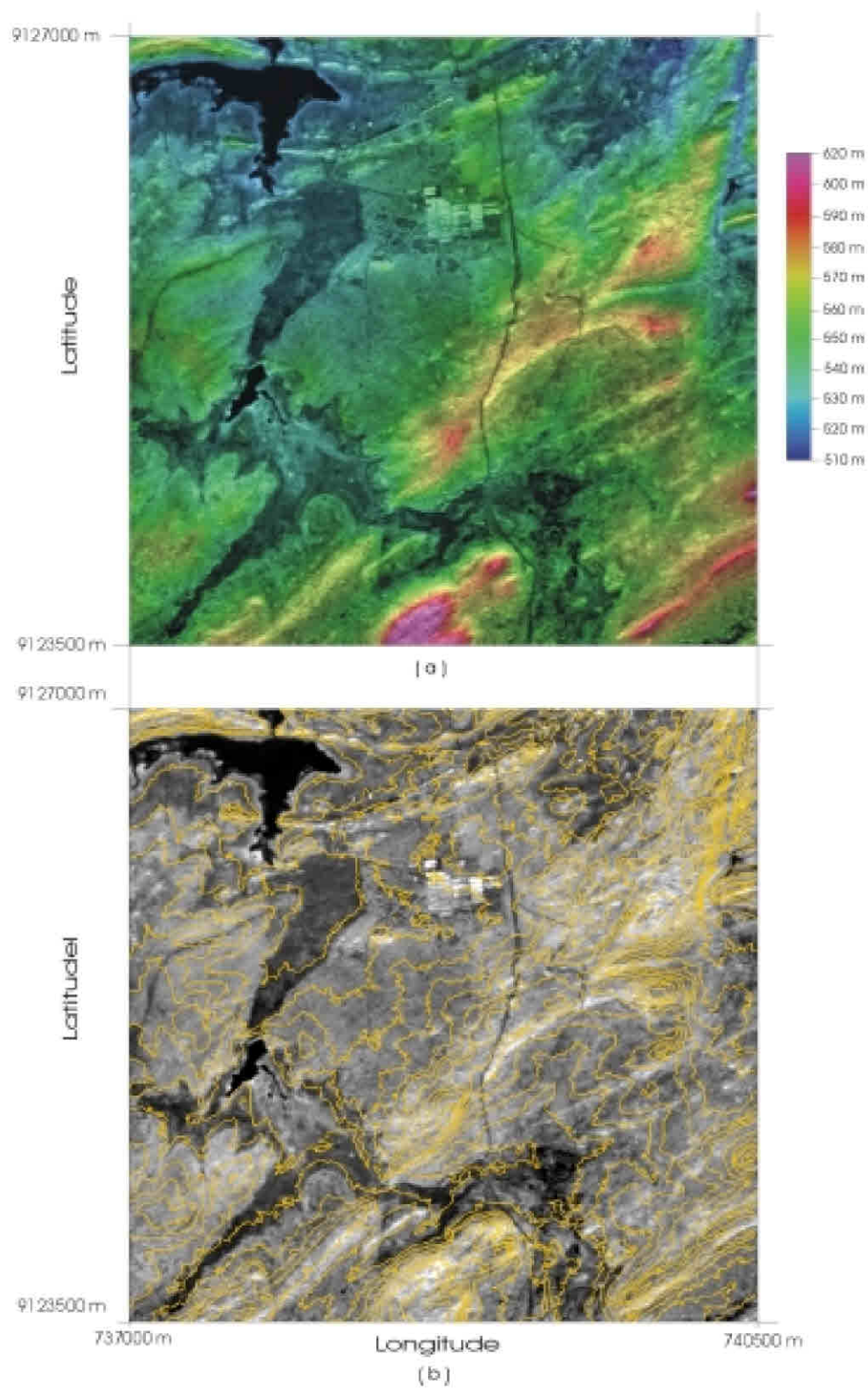


Fig. 5.3 - Exemplo de carta hipsométrica (a) e orto-imagem com curvas de nível (b).

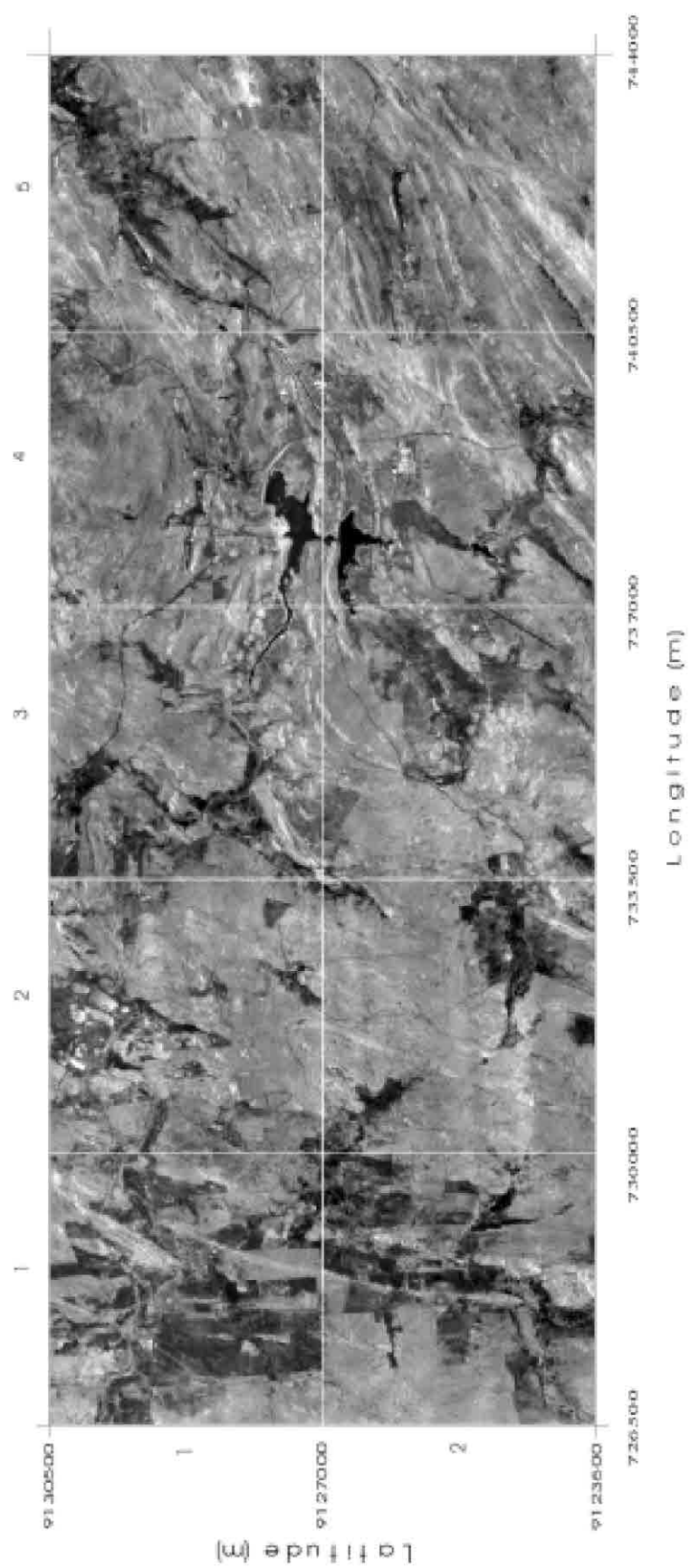


Figura 6.4 - Mosaico de Orto-Imagens SAR da área teste

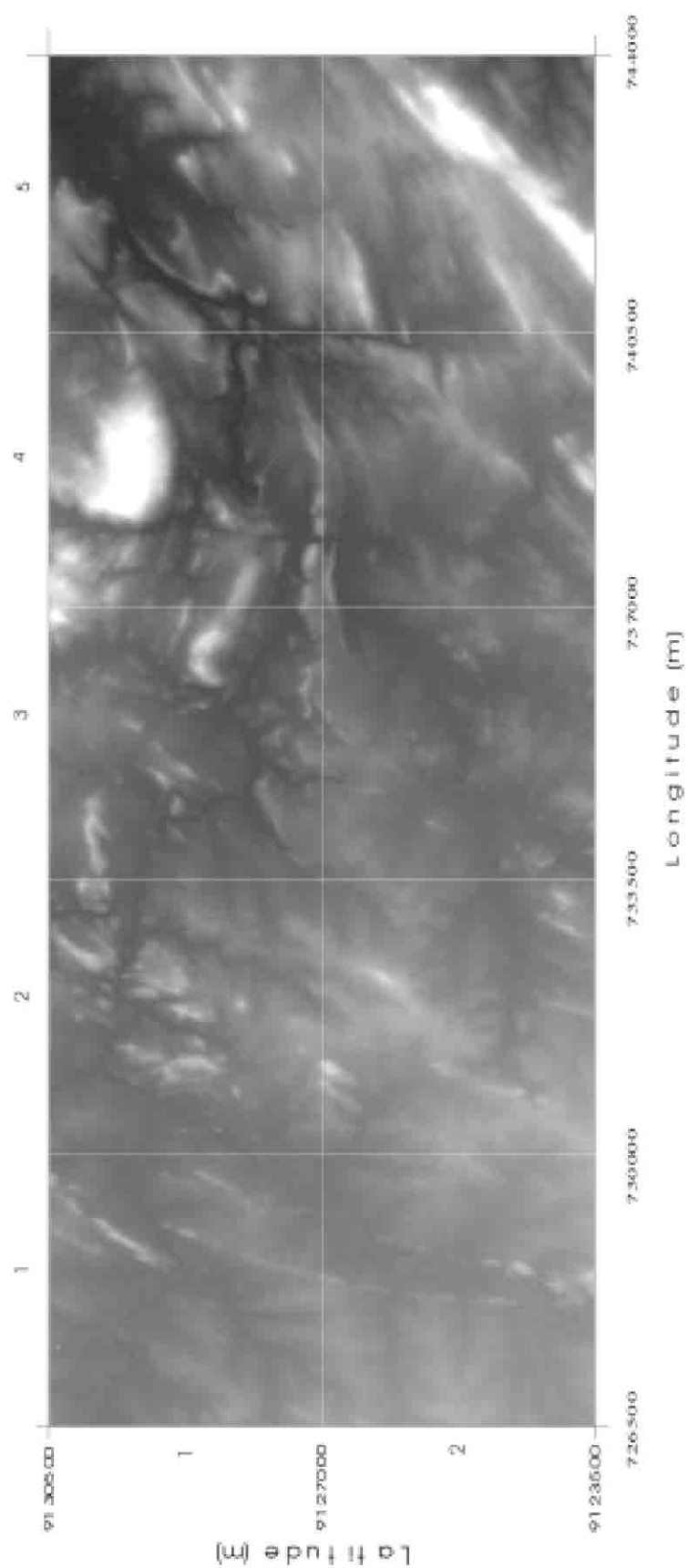


Figura 5.5 - Mosaico de Modelos de Elevação da área teste

5.1 Resultados Quantitativos

Em um processo de mapeamento sistemático, é muito importante que os MNTs de cada carta topográfica apresentem continuidade, ou seja, que as diferenças na vizinhanças não excedam um limiar tolerado. Este limiar é definido como sendo a metade do intervalo entre as curvas de nível da carta, que está relacionado com a escala da carta.

No primeiro experimento realizado na área teste, a etapa de calibração de fase foi realizada de três maneiras, na seguinte ordem de prioridade: utilizou-se pontos de controle, quando presentes, utilizou-se o novo método de calibração de fase proposto, e por último utilizou-se o método baseado em áreas já geocodificadas e sobrepostas.

Na área escolhida, existiam pontos de controle em duas cartas, ou seja, na carta 1_1 e na carta 1_5, segundo o esquema da Figura 5.1. Nestas duas cartas o “*offset*” de fase foi calculado inicialmente utilizando os pontos de controle, nas demais cartas utilizou-se o novo método e o método baseado em áreas já geocodificadas e sobrepostas. A Tabela 5.1 ilustra os tempos médios de processamento das várias etapas envolvidas no processo automático de geocodificação, do primeiro experimento. Os tempos em negrito são referentes ao uso de pontos de controle.

A análise de erros consistiu em verificar as diferenças entre os MNTs, tomando como referência os dois MNTs das cartas 1_1 e 1_5. A Figura 5.6 ilustra o mosaico dos MNTs com as áreas de sobreposição entre os MNTs representada em cores. As cores representam a diferença em metros entre os MNTs, na área de sobreposição entre eles. No caso da Figura 5.6 a faixa de cores corresponde às diferenças na faixa de 0 e 2 metros.

A Figura 5.7 ilustra o mosaico de MNTs, com as cores representando a faixa de diferença compreendida entre 1 e 2 metros. A ausência de cores na área de sobreposição indica uma diferença menor que 1 metro.

TABELA 5.1 – TEMPOS MÉDIOS DE PROCESSAMENTO DAS VÁRIAS ETAPAS DO PROCESSO AUTOMÁTICO DE GEOCODIFICAÇÃO INSAR, DO PRIMEIRO EXPERIMENTO

Carta		Tempo de processamento médio (minutos)					
	No. Imagens	Preparação	Cálculo do “ <i>offset</i> ” de fase através do Novo Método Proposto	Cálculo do “ <i>offset</i> ” de fase através de “ <i>overlap</i> ” de áreas	Geocodificação	Mosaicação	Total
1_1	9	4.6	2.1	15.3	96.4	18.1	136.6
1_2	9	4.1	12.8	14.8	99.3	19.3	150.3
1_3	9	3.7	14.6	15.1	98.2	17.9	149.5
1_4	9	3.9	14.2	13.8	102.5	18.7	153.1
1_5	9	4.0	2.1	16.1	97.5	20.1	139.8
2_1	9	4.4	15.9	14.2	99.3	18.9	152.7
2_2	9	3.8	13.7	16.1	100.9	17.2	152.6
2_3	9	4.2	13.3	15.2	96.0	18.9	147.6
2_4	9	4.1	14.0	14.4	104.3	17.9	154.7
2_5	9	4.5	12.9	15.8	96.8	19.8	149.8
Tempo médio geral por carta		4.1	13.9 2.1	15.1	99.1	18.7	151.2 138.2

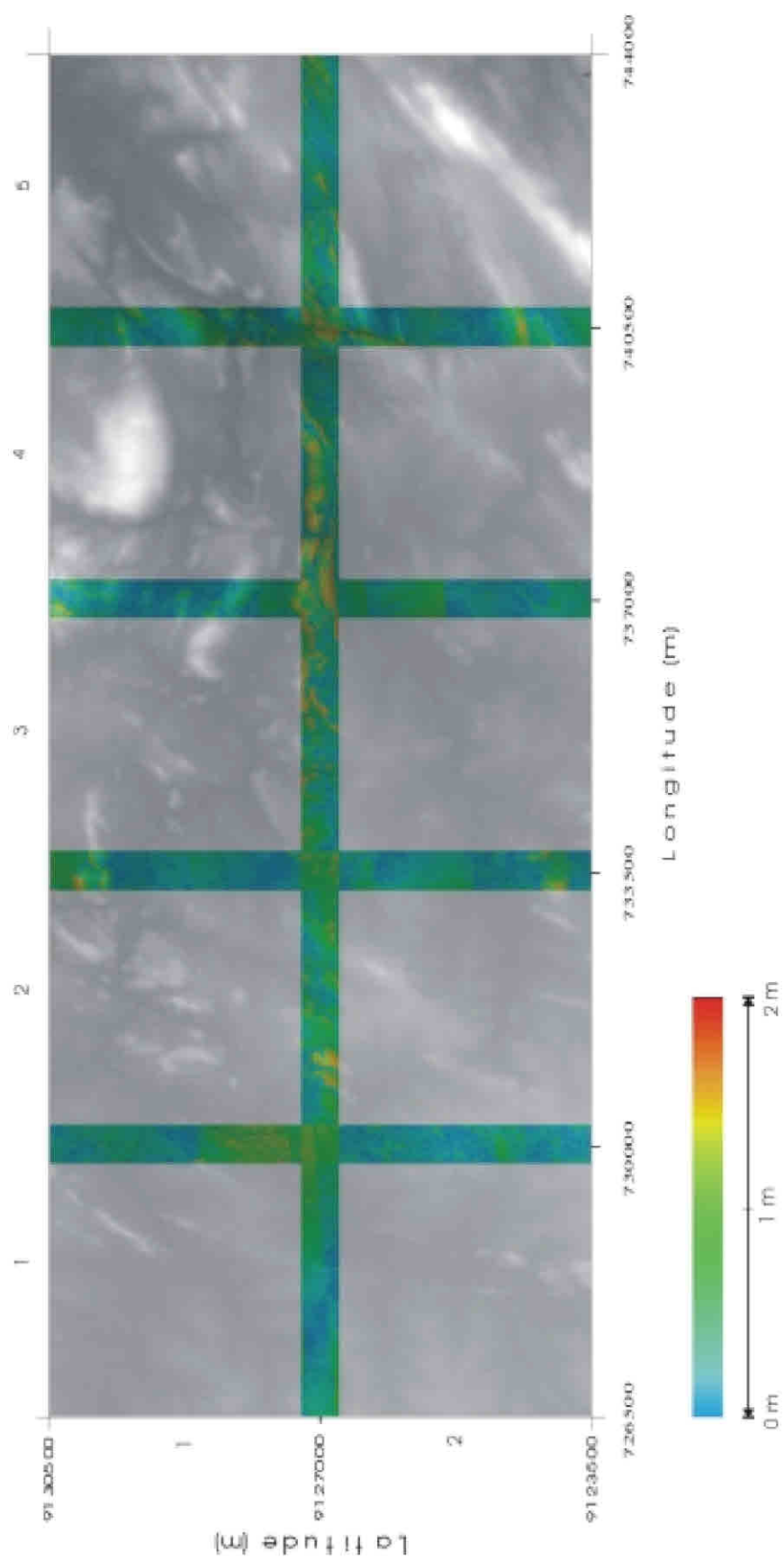


Figura 5.6 - Diferença entre os MN Ts nas áreas de sobreposição entre as cartas

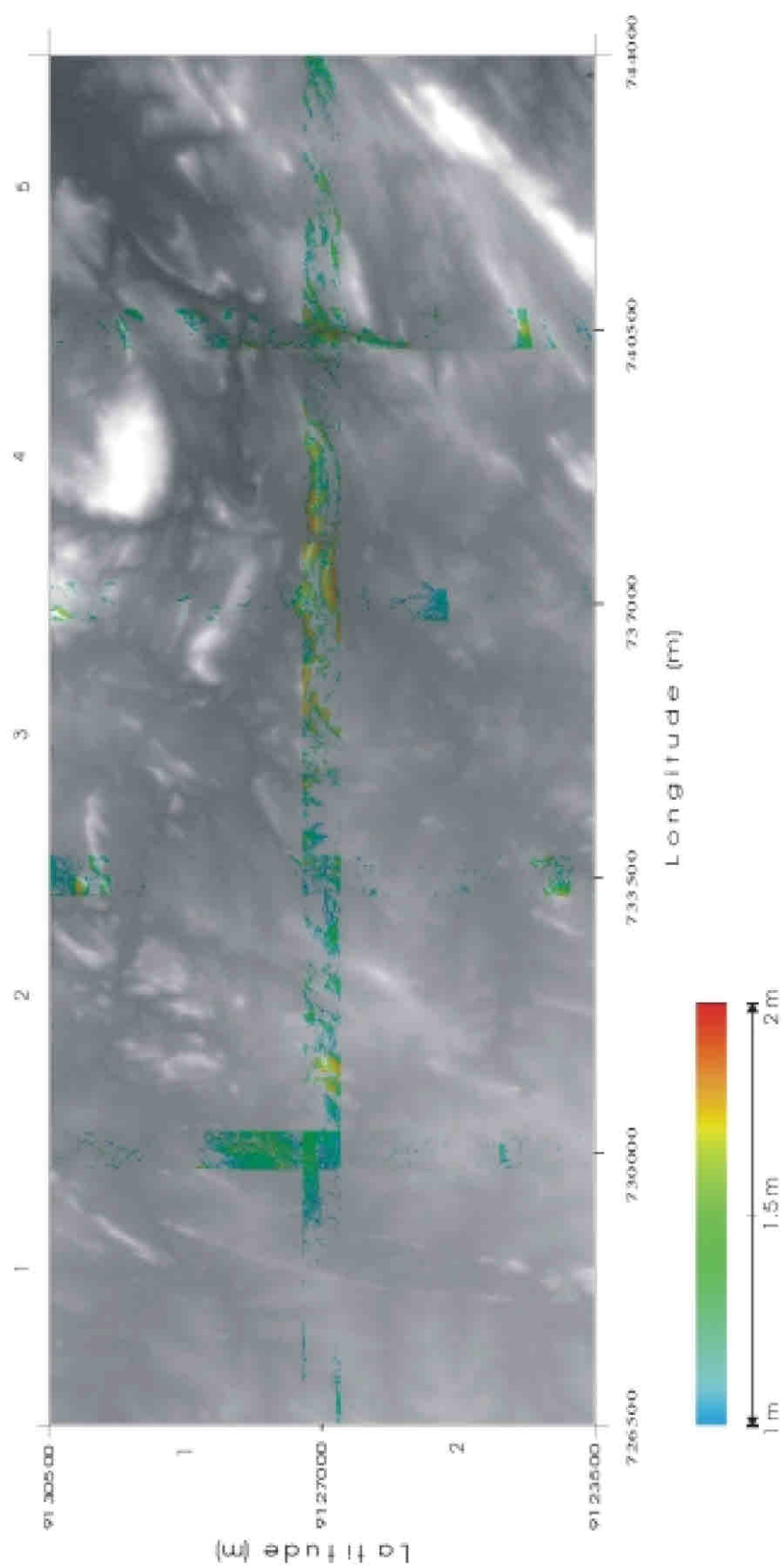


Figura 5.7 - Diferença entre os MNTs na faixa entre 1 a 2 metros

A Tabela 5.2 ilustra os tempos médios de processamento das várias etapas do processo automático de geocodificação InSAR, do segundo experimento, onde se utilizou o método de Minimização de Função de Erro. Os tempos em **negrito** são referentes ao uso de pontos de controle.

A Figura 5.8 ilustra o mosaico dos MNTs gerados no segundo experimento, com as áreas de sobreposição entre os MNTs representados em cores, corresponde às diferenças na faixa de 0 e 2 metros.

A Figura 5.9 ilustra o mosaico de MNTs, com as cores representando a faixa de diferença compreendida entre 1 a 2 metros. A ausência de cores na área de sobreposição indica uma diferença menor que 1 metro.

TABELA 5.2 – TEMPOS MÉDIOS DE PROCESSAMENTO DAS VÁRIAS ETAPAS DO PROCESSO AUTOMÁTICO DE GEOCODIFICAÇÃO INSAR, DO SEGUNDO EXPERIMENTO

Carta		Tempo de processamento médio (minutos)					
	No. Imagens	Preparação	Cálculo do “offset” de fase através do Método Min. de Função	Cálculo do “offset” de fase através de “overlap” de áreas	Geocodificação	Mosai-cagem	Total
1_1	9	4.6	2.3	16.3	96.4	18.1	137.0
1_2	9	4.1	258.9	14.8	99.3	19.3	393.4
1_3	9	3.7	322.1	15.1	98.2	17.9	457.5
1_4	9	3.9	242.5	13.8	102.5	18.7	376.4
1_5	9	4.0	2.1	16.8	97.5	20.1	140.2
2_1	9	4.4	335.2	14.2	99.3	18.9	468.8
2_2	9	3.8	283.1	16.1	100.9	17.2	417.8
2_3	9	4.2	234.7	15.2	96.0	18.9	369.0
2_4	9	4.1	293.2	14.4	104.3	17.9	427.9
2_5	9	4.5	221.6	15.8	96.8	19.8	357.4
Tempo médio geral por carta		4.1	273.9 2.2	15.1	99.1	18.7	408.5 138.2

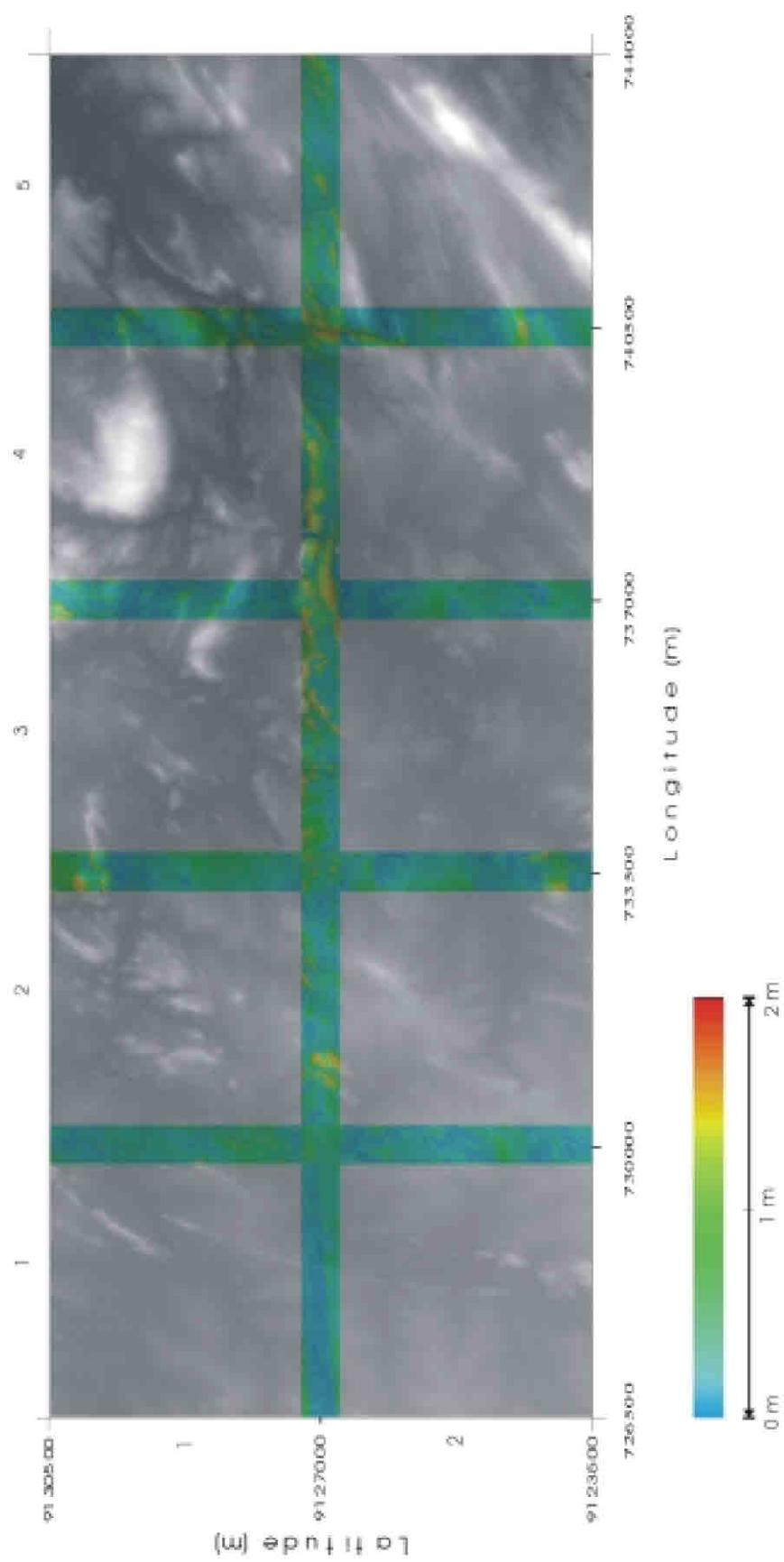


Figura 5.8 - Diferença entre os MNTs nas áreas de sobreposição entre as cartas - Método de Minimização de Função

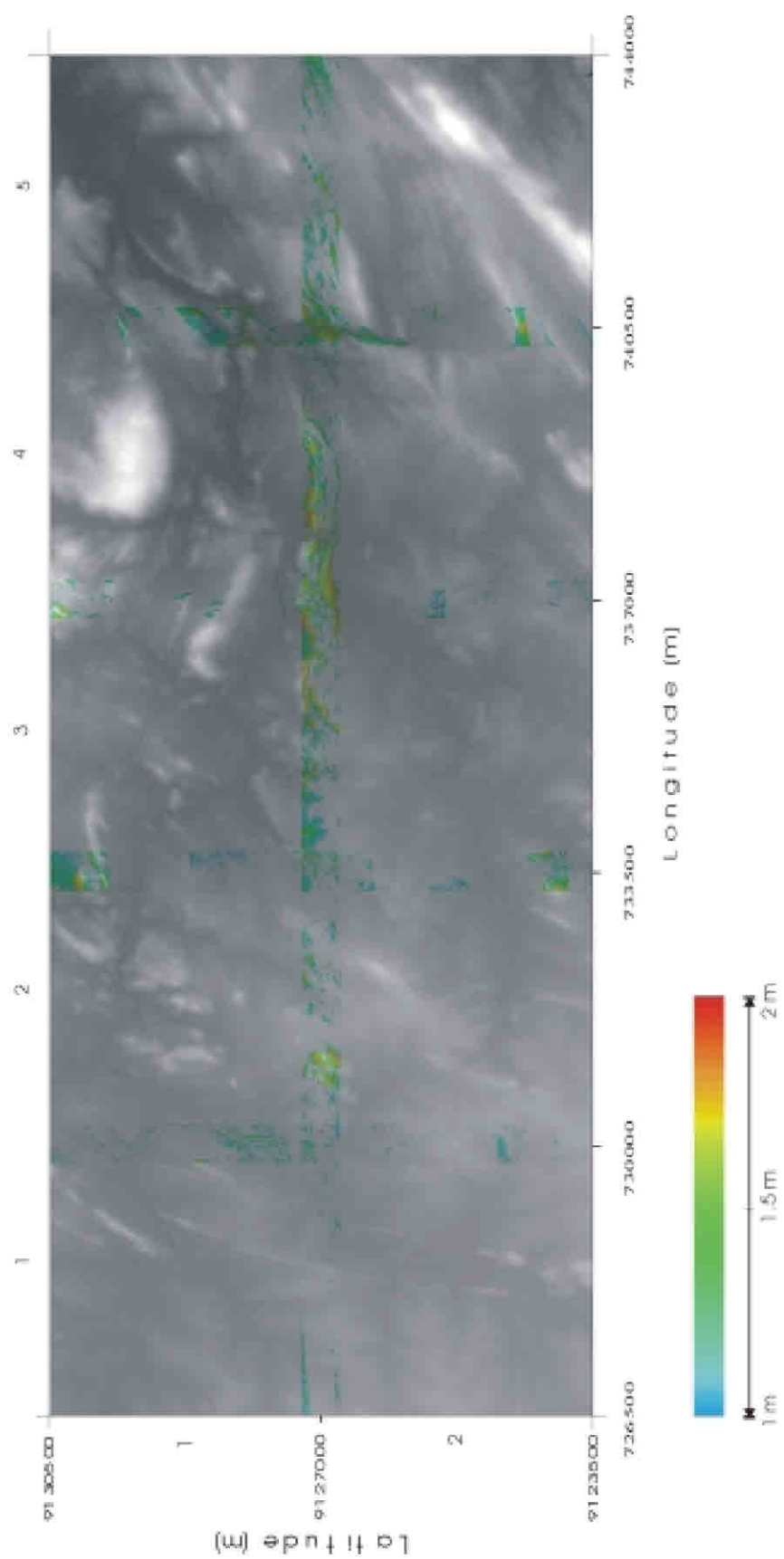


Figura 5.9 - Diferença entre os MNTs na faixa entre 1 a 2 metros, utilizando o método de Minimização de Função

5.2 Análise dos Resultados do Mosaico

Os tempos de processamento representados nas Tabelas 5.1 e 5.2, correspondentes aos dois experimentos e resumidos na Tabela 5.3, mostram que houve um ganho médio de 2.7 (coluna 4/coluna2) vezes no tempo de processamento total, para se gerar uma orto-imagem carta, no primeiro experimento, ou seja, quando se utilizou o método de cálculo de “*offset*” de fase proposto neste trabalho.

Considerando somente os tempos de processamento para cálculo dos “*offset*” de fase entre o novo método e o método baseado em minimização de função de erro, o ganho foi de 19.7 (coluna 3/coluna1) vezes a favor do novo método.

TABELA 5.3 - COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO ENTRE OS DOIS EXPERIMENTOS

Carta	Cálculo do “ <i>offset</i> ” Novo método Proposto (1) (min)	Total da Carta (2) (min)	(1)/(2) %		Cálculo do “ <i>offset</i> ” Método Min. de Função (3) (min)	Total da Carta (4) (min)	(3)/(4) %
1_2	12.8	150.3	8.5		258.9	393.4	65.8
1_3	14.6	149.5	9.7		322.1	457.5	70.3
1_4	14.2	153.1	9.2		242.5	376.4	64.5
2_1	15.9	152.7	10.4		335.2	468.8	71.5
2_2	13.7	152.6	8.9		283.1	417.8	67.7
2_3	13.3	147.6	9.0		234.7	369.0	63.6
2_4	14.0	154.7	9.0		293.2	427.9	63.6
2_5	12.9	149.8	8.6		221.6	357.4	62.0
Valor médio	13.9	151,2	9.1		273.9	414.5	66.1

A tabela 5.4 apresenta uma estatística das diferenças entre os MNTs das cartas geradas, nas áreas sobrepostas, nos dois experimentos realizados.

TABELA 5.4 - DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS NAS ÁREAS DE SOBREPOSIÇÃO ENTRE OS MNTs

Intervalo de análise (m)	Experimento 1 (utilizando o novo método de calibração de fase)		Experimento 2 (utilizando o método de minimização de função)	
	Porcentagem de ocorrência		Porcentagem de ocorrência	
	Por faixa	Acumulada	Por faixa	Acumulada
$0.0 \leq \Delta_h < 0.5$	57.95 %	57.95 %	59.36 %	59.36 %
$0.5 \leq \Delta_h < 1.0$	29.53 %	87.48 %	28.89 %	88.25 %
$1.0 \leq \Delta_h < 1.5$	8.17 %	95.65 %	8.64 %	96.89%
$1.5 \leq \Delta_h < 2.0$	2.91 %	98.56%	1.72 %	98.61%
$\Delta_h \geq 2.0$	1.44%		1.39%	
Diferença média (m)	0.601		0.593	

Os dados de imagens SAR utilizados, adquiridos com uma resolução espacial de 0.5 x 0.5 metros e transformados para uma resolução de 1.0 x 1.0 após a geocodificação, possibilitam a geração de cartas topográficas na escala de até 1:5000.

A utilização do método automático de geocodificação InSAR proposto, para gerar cartas topográficas nas diversas escalas, passa pelas seguintes considerações:

- a) Os modelos de elevação das cartas 1_1 e 1_5 são considerados exatos, pois na geração destes modelos, foram utilizados pontos de controle, conforme ilustrado na da Figura 5.1, para cálculo dos “*offset*” de fase.
- b) No primeiro experimento realizado, utilizando-se o novo método de calibração de fase proposto, verificou-se a presença de algumas regiões com diferenças entre os modelos de elevação maiores que 1.0 metro, como pode ser visto nas Figuras 5.6 e 5.7. Apesar destas regiões serem pequenas se comparadas com a área total do experimento, haveria a necessidade de pequenos ajustes nos modelos de elevação, para decrementar estas diferenças abaixo de 1.0 metro, no sentido de possibilitar a geração de cartas na escala mais alta, ou seja, de 1:5000.
- c) No mesmo experimento, verifica-se através da Figura 5.7 e dos valores da Tabela 5.4, que os modelos seriam apropriados, sem a necessidade de nenhum ajuste, para a geração de cartas topográficas nas escalas inferiores a 1:5000, ou seja, 1:8000, 1:10000, etc., pois as diferenças altimétricas entre os MNTs são pequenas para estas escalas.
- d) No segundo experimento, utilizando-se o método de minimização de função para cálculo de “*offset*” de fase, nota-se também a presença de algumas regiões com diferenças maiores que 1.0 metro, segundo as Figuras 5.8 e 5.9. Necessitando também de pequenos ajustes nos modelos de elevação, para decrementar estas diferenças abaixo de 1.0 metro, no sentido de possibilitar a geração de cartas na escala mais alta, ou seja, de 1:5000.
- e) No mesmo experimento, verifica-se também através das Figuras 5.9 e dos valores da Tabela 5.4, que os modelos seriam apropriados, sem a necessidade de nenhum ajuste, para a geração de cartas topográficas nas escalas inferiores a 1:5000, pois as diferenças altimétricas entre os MNTs são pequenas.

5.3 Análise dos Resultados Altimétricos nos Pontos de Controle

No esquema da Figura 5.1, os dois grupos de “*corner reflectors*” estão localizados em duas imagens, imagem 1 e imagem 2, cujos interferogramas foram utilizados nesta análise. Os “*offset*” de fase dos interferogramas, correspondentes às duas imagens, foram calculados segundo os métodos descritos nos itens 3.1 e 3.3, ou seja, pelo método do ponto de controle e o pelo novo método proposto, respectivamente.

Na utilização do novo método, considerou-se para cada grupo, a imagem com os “*corner reflectors*” como sendo a aquisição 1 e a vizinha ao norte como sendo a aquisição 2, conforme esquema da Figura 5.1.

Para cada imagem gerou-se dois MNTs, no primeiro (MNTco) utilizou-se o valor de “*offset*” de fase calculado através do ‘método do ponto de controle’, e no segundo (MNTnm), utilizou-se o valor de “*offset*” de fase, calculado através do ‘novo método proposto’.

As medidas de altura de cada ponto de controle, para os dois grupos de “*corner reflectors*”, obtidas por GPS, quando da criação dos pontos de controle, e através dos MNTs, estão ilustrados na Tabela 5.5. Os valores de “*offset*” de fase de cada imagem estão bem próximos, para os dois métodos utilizados, devido a isto, os valores altimétricos de cada ponto de controle também ficaram bem próximos.

TABELA 5.5 – VALORES ALTIMÉTRICOS NOS PONTOS DE CONTROLE

Imagem onde existe pontos de controle	“corner reflector”	GPS	MNTco		MNTnm	
		Altura (m)	Altura (m)	“offset” de fase (rd) (Utilizando pontos de controle)	Altura (m)	“offset” de fase (rd) (Utilizando o novo método)
Imagem 1	1	568.950	569.211	7.851	568.816	7.947
	2	569.631	569.403		569.108	
	3	568.890	568.567		568.239	
Imagem 2	1	532.174	532.216	14.055	532.504	13.982
	2	529.513	529.270		529.579	
	3	524.168	524.246		524.505	

A Tabela 5.6 apresenta para cada ponto de controle, a diferenças entre a altura de referência, no caso a medida por GPS geodésico, e as obtidas através dos MNTs. Nota-se na coluna (GPS – MNTco) que existem diferenças altimétricas nos pontos de controle. Teoricamente esta diferença deveria ser zero, mas devido aos erros introduzidos por ruídos de fase, erros de processamento, erros na medida DGPS, esta diferença é diferente de zero. No experimento realizado, os erros entre (GPS – MNTco) e mesmo entre (GPS – MNTnm) são considerados pequenos.

**TABELA 5.6 – DIFERENÇA ALTIMÉTRICA ENTRE GPS E OS MNTS
NOS PONTOS DE CONTROLE**

Imagem	“corner reflector”	Diferenças altimétrica (m)		
		GPS – MNT _{co}	GPS – MNT _{nm}	MNT _{co} – MNT _{nm}
Imagem 1	1	-0.261	0.134	0.395
	2	0.228	0.523	0.295
	3	0.323	0.651	0.328
Imagem 2	1	-0.042	-0.330	-0.288
	2	0.243	-0.066	-0.309
	3	-0.078	-0.337	-0.259
Erro quadrático médio (m)		0.220	0.396	0.336

A Tabela 5.7 apresenta o erro médio e quadrático médio entre MNT_{co} e MNT_{nm}, calculados sobre todos os pontos dos MNTs. O operador < > indica uma operação de média.

**TABELA 5.7 – DIFERENÇA MÉDIA E QUADRÁTICA MÉDIA
ENTRE OS MNTS**

Imagem	<MNT _{co} – MNT _{nm} > (m)	$\mathcal{E}_{MNT}$ (m)
Imagem 1	0.342	0.387
Imagem 2	-0.295	0.343

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 – Resumo e Conclusões

Nesta tese apresentou-se uma metodologia para geocodificação automática de imagens SAR interferométricas aerotransportadas, visando a geração de produtos cartográficos, onde se utilizou um novo método de calibração de fase interferométrica.

A calibração de fase interferométrica de cada interferograma, é uma das etapas mais críticas na geração de cartas topográficas a partir de dados SAR interferométricos, pois afeta diretamente a exatidão do modelo de elevação.

As técnicas conhecidas para calibração de fase são as seguintes: o uso de pontos de controle, o método baseado em minimização de função, e o uso de áreas vizinhas sobrepostas e geocodificadas.

O novo método de calibração de fase baseia-se na construção de funções que relacionam o “*offset*” de fase com altitude, em um conjunto de pontos na região de sobreposição entre dois interferogramas. Para cada ponto, relaciona-se a função de “*offset*” do primeiro, com a função de “*offset*” do segundo, através de um processo de interpolação. Este conjunto de novas funções apresenta um ponto de cruzamento, de onde é possível estimar os valores dos “*offset*” de fase dos dois interferogramas.

Este novo método mostrou-se robusto, fornece praticamente os mesmos resultados que o método baseado em minimização de função, conforme pode ser visto na Tabela 3.2, e é cerca de 20 vezes mais rápido computacionalmente que o anterior.

Devido à rapidez, robustez e exatidão do método, ele mostrou-se apropriado para ser utilizado em um processo automático de geocodificação de imagens SAR interferométricas, chamado neste trabalho de geocodificação InSAR, conforme descrito no Capítulo 4, e testado no Capítulo 5.

Os resultados gerados pelo processo automático de geocodificação, nos dois experimentos realizados, ilustrados nas Figuras 5.6 e 5.8 principalmente, mostram que não houve erro sistemático na área testada, nos modelos de elevação gerados, e também não houve tendência de erro, caracterizando a não propagação de erros.

O primeiro experimento, utilizando o novo método de calibração de fase, descrito no Capítulo 3, mostrou-se em média 2.7 vezes mais rápido que o segundo experimento, onde se utilizou o método baseado em minimização de função para calibração de fase. Os resultados dos dois experimentos, em termos de diferenças entre os modelos de elevação, foram praticamente os mesmos.

Em termos da geração automática de orto-imagens carta, pode-se concluir que este processo é adequado para a geração de carta nas escalas inferiores a 1:5000, sem nenhuma intervenção manual. Nas escalas iguais e superiores a 1:5000 necessitam de pequenos ajustes manuais nos MNT de cada carta, para que os erros estejam dentro dos limite especificados para estas escalas.

O uso deste novo método mostra que é possível reduzir o número de pontos de controle. Baseado nas Tabelas 5.3 e 5.6, é possível gerar cartas nas escalas inferiores a 1:5000, sem a necessidade do uso de pontos de controle, para calibração de fase, ou seja, em uma área como ilustrada na Figura 5.1, apenas um ponto de controle é suficiente para verificação do geo-referenciamento.

A redução do número de pontos de controle, a redução do tempo de processamento, e a automatização do processo como um todo, reduz o custo de um projeto de produção cartográfica baseado em radargrametria.

6.2 – Futuras Pesquisas e Desenvolvimento

Uma sugestão para futuras pesquisas no problema da determinação de “*offset*” de fase interferométrica, é a introdução de um controle sobre o número de pontos utilizados na construção das funções que relaciona “*offset*” de fase com a altitude do ponto, na área de sobreposição, ou seja, ao invés de utilizar um certo número de pontos fixos, o número de pontos seria controlado através de uma medida de dispersão do cruzamento das funções, como ilustrado na Figura 3.6. Neste caso, uma dispersão baixa implicaria em utilizar poucos pontos, uma dispersão alta implicaria em utilizar mais pontos. Esta dispersão depende muito do ruído de fase presente no interferograma.

Outra sugestão para melhoria do desempenho do novo método de calibração de fase, é a introdução do modelo de elevação grosseiro da área, na região de sobreposição entre as duas aquisições. Isto possibilitaria conhecer melhor o intervalo altimétrico de cada ponto, utilizado na geração das funções que relacionam “*offset*” de fase com a altitude do ponto, melhorando com isto a eficiência do método.

Uma possibilidade que pode ser verificada para a melhoria da acurácia dos valores de “*offset*” de fase, seria a utilização conjunta dos dois métodos, ou seja, os valores “*offset*” de fase obtidos pelo novo método, serem utilizados como valores iniciais pelo método de minimização de função de erro.

Em relação ao processo automático de geocodificação de imagens SAR interferométricas, uma sugestão para sua melhoria, é no sentido de detectar onde e em quais cartas estão as diferenças no modelo de elevação, na área de sobreposição, acima do limite associado a escala da carta. E em relação a cada carta com problema, a possibilidade de saber quais imagens estariam com erros acima do limite, para facilitar o processo de ajuste dos modelos de elevação.

Na etapa de mosaicagem das orto-imagens SAR de uma carta, nas áreas onde existem sobreposições de imagens, ao invés de utilizar uma imagem ou outra, selecionada a partir do mapa de resolução, uma proposta para a melhoria dos valores radiométricos

do mosaico, seria a fusão das orto-imagens, governada por uma relação entre os fatores de coerência de cada imagem, e também pelo mapa de resolução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnettler, A.; Meier, E.; Nüesch, D. SAR preprocessing: flight tracks reconstruction using GPS and INS [online]. Zurich, Switzerland, University of Zurich: Remote Sensing Laboratory: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/projects/gpsimu>>, Dec. 1998.
- Bamler, R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing Algorithms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 706-713, 1992.
- Bamler, R.; Schattler, B. SAR data acquisition and image formation. In: **SAR geocoding: data and systems**. Karlsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 3, p. 53-102.
- Buckreuss, S. Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 2, n. 6, p. 655-663, 1991.
- Candeias, A. L. B.; Mura, J. C.; Dutra, L. V.; Moreira J. R. Interferogram phase noise reduction using morphological and modified median filters. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Florence, 1995. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v.1, p. 166-168.
- Curlander, J.C.; MacDonald, R. N. **Synthetic aperture radar - System and signal processing**. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- Curlander, J. C. Location of spaceborne SAR imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-20(3), p. 359-364, 1982.
- Davidson, G. W.; Bamler, R. Robust 2-D phase unwrapping based on multiresolution. In: International Society for Optical Engineering. **Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar**. Bellingham. Wash.:SPIE, 1996. p. 226-237. (SPIE Proceeding, v. 2958).

- Fernandes, D.; Waller, G.; Moreira, J. R. Registration of SAR images using the chirp scaling algorithm. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Singapore, 1997. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1. p. 799-801.
- Fornaro, G.; Franceschetti, G.; Marzouk, E.S. A new approach for image registration in interferometric processing. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Pasadena, 1994. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 1983-1985.
- Fornaro, G.; Franceschetti, G.; Lanari, R. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 3, p. 720-727, May 1996.
- Franceschetti, G.; Lanari, R.; Marzouk, E. S. Efficient and high precision space-variant processing of SAR data. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 31, n. 1, Jan 1995.
- Frei, Urs; Graf K. C.; Meier E. Cartographic Reference System. In: **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 10, p. 213-234.
- Frery, A. C.; Yanasse, C. C. F.; Sant'Anna, S. J. S. Statistical characterization of SAR data: the multiplicative model an extensions. In: Simposio de Especialistas Latino Americanos en Percepción Remota (SELPER), México, 1995. **Anais**, p. 502-515.
- Frost, V. S.; Stiles, J. A.; Shanmugan, K. S.; Holtzman, J. C. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. V. PAMI-4, n. 2, p. 157-166, March 1982.
- Gabriel, A. K.; Goldstein, R. M. Crossed orbits interferometry: Theory and experimental results from SIR-B. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 857-872, 1988.

- Ghiglia, D. C.; Romero, L. A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. **Journal Optics Society of American**, v. 11, n. 1, p. 107-117, Jan. 1994.
- Goblirsch, W.; Pasquali, P. Algorithms for calculation of digital surface models from the unwrapped interferometric phase. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1, p. 656-658.
- Goldstein, R. M.; Zebker, H.; Werner, C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, Aug. 1988.
- Graham, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **Proceeding of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 763-768, June 1974.
- Hagberg, J. O.; Ulander, L. M. H. On the optimization of interferometric SAR for topographic mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 303-306, Jan. 1993.
- Holecz, F.; Meier, E.; Nüesch, D. Postprocessing of Relief Induced Radiometric Distorter Spaceborne SAR Imagery. In: **SAR geocoding: data and systems**. Karlsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 14, p. 299-352.
- Jensen, H.; Graham L. C.; Porcello L. J.; Leith E. N. Side-Looking Airborne Radar, **Scientific American**, v. 237, p. 84-95, 1977.
- Jin, M.; Wu, C. A SAR correlation algorithm which accommodates a large range-migration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. GE-22, p. 592-597, 1984.
- Just, D.; Bamler, R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. **Applied Optics**. v. 33, n. 20, p. 4361-4368, July 1994.

- Lee, J. S.; Papathanassiou, K. P.; Ainsworth, T. L.; Grunes, M. R.; Reigber, A. A new technique for noise filtering os SAR interferogram phase images. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Singapore, 1997. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 4, p. 1716-1718.
- Li, K. L.; Goldstein, M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 28, n. 1, p. 88-97, Jan. 1990.
- Lin, Q.; Vesecky, J. F.; Zebker, H. A. Registration of interferometric SAR images. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Helsinki, 1991. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 2173- 2176.
- Kay, S. S. **Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- Kwok, R.; Curlander, J., C. Automated Rectification and Geocoding of SAR Imagery. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Ann Arbor, 1987. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 18-21.
- Madsen, S. N. Estimating the Doppler centroid of SAR data. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System**, AES-25, p. 134-140, 1989.
- McDonough, R. N.; Raff B. E. ; Kerr J. L. Image formation from spaceborne synthetic aperture radar signals. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, 6(4), p. 300-312, 1985.
- Meier, E.; Frei, U.; Nüesch, D. Precise Terrain Correct Geocoded Images. In: **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 7, p. 173-186.

- Moreira, A; Huang, Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp **scaling** approach with integrated motion compensation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v 32, n. 5, Sept. 1994.
- Moreira, J. R. Estimating the residual error of the reflectivity displacement method for aircraft motion error extraction from SAR raw data, In: International Radar Conference, **Proceeding**, p. 70-75, 1990.
- Mura, J. C. Performance and interferometric capabilities of the INPE/DLR SAR processor. In: 8^o Radarsymposium. Neubiberg: Verlag TÜV Rheinland, Sept. 1993, p. 166-171.
- Mura, J. C.; Candeias, A. L. B.; Dutra, L. V.; Moreira J. R. Evaluation of the phase noise reduction filters in SAR interferometry. In: First Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing - Image Processing Techniques, Buenos Aires, Fev. 1997. Noordwijk: **ESA**. SP-407, p. 43-46
- Oliveira, C. **Curso de cartografia moderna**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1988.
- Pasquali, P.; Holecz, F. InSAR phase calibration [online], Ticino, Switzerland: SARMAP S.A., <<http://www.sarmap.ch>>, Jan. 1998.
- Prati, C.; Rocca, F.; Guarnieri, A. M. e Damonti, E. Seismic migration for SAR focusing: interferometrical applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 28(4), p. 627-640, July 1990.
- Press, W. H; Flannery B. P. **Numerical recipes in C: The Art of Scientific Computing**. Cambridge: Cambridge University Press, 2nd ed. ,1992.
- Pritt, M. D.; Shipman, J. S. Least-Squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 2, p. 706-708, May 1994.

- Pritt, M. D. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 3, p. 728-738, May 1996.
- Raney, R. K.; Vachon, P. W. A phase preserving SAR processor. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Vancouver, 1989. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 2588-2591.
- Raney, R.; Runge, H.; Bamler, R.; Cumming, I. G.; Wong, H. Precision SAR processing using chirp scaling. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 4, July 1994.
- Reigber, A.; Moreira, J. R. Phase unwrapping by fusion of local and global methods. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Singapore, 1997. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 2, p. 869-871.
- Richards, J., A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- Rocca, F.; Prati, C.; Monti, G. A. A new algorithm for processing of SAR data. **European Space Agency contract report**. Noordwijk: ESA Publications Division, 1989.
- Rogers, A. E. E.; Ingalls, R. P. Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry. **Science**, n. 165, p. 797-799, 1969.
- Roth, A.; Craubner A.; Hügel T. Standard geocoded ellipsoid corrected images. In: **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 6, p. 159-172.

- Runge, H.; Bamler, R. A novel high precision SAR focusing algorithm based on chirp **scaling**. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Houston, 1992. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 372-375.
- Rumsey, H. C. ; Morris, G. A.; Green, R. R.; Goldstein, R. M. A radar brightness and altitude image of a portion of Venus, **Icarus**, n. 23, p. 1-7, 1974.
- Sant'Anna, S. J. S. **Avaliação do desempenho de filtros redutores de Speckle em imagens de radar de abertura sintética**. São José dos Campos. (INPE-6125-TDI/586). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- Seymour, M. S.; Cumming, I. G. Maximum likelihood estimation for SAR interferometry. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Pasadena, 1994. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. p. 2282-2284.
- Schwäbisch, M. Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. **DLR Forschungsbericht**. Oberpfaffenhofen, Aug. 1995, p 95-25.
- Schreier, G. **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe:Wichmann Verlag, 1993.
- Small, D.; Pasquali, P.; Fuglistaler, S. A Comparison of phase to height conversion method for SAR interferometry. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1, p. 342-344.
- Werner, D. R. **High resolution radar**. Norwood: Artech House, 1987.

- Wu, C.; Liu, K. Y.; Jin, M. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, AES-18, p. 563-575, 1982.
- Xu, W.; Cumming, I. A Region Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 3, p. 2044-2047
- Yanasse, C. C. F.; Frery, A. C.; Sant'Anna, S. J. S. **Stochastic distributions and the multiplicative model: relations, properties, estimators and applications to SAR image analysis**. São José dos Campos: INPE, 1995. (INPE-5630-NTC/318).
- Zebker, H.; Goldstein, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. B5, p. 4993-4999, April 1986.
- Zebker, H. A.; Madsem, S. N.; Martin, J.; Wheeler, K. B.; Miller, T.; Lou, Y.; Alberti, G.; Vetrella, S.; Cucci, A. The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 923-940, Sep 1992.
- Zebker, H. A. e Villasenor, J. Decorrelation in interferometric radar echoes, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959, Sep 1992.
- Zebker, H. A.; Werner, C. L.; Rosen, P. A. e Hensley, S. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 823-836, July 1994.
- Zisk, S. H. A new earth-based radar technique for the measurement of lunar topography. **Science**, n. 4, p. 296-306, 1972.

APÊNDICE A

DISTORÇÕES EM RADARES DE VISADA LATERAL

O eco recebido de cada pulso emitido pelo radar, é amostrado em intervalos regulares, T_a , conforme ilustrado na Figura A.1, e armazenados em algum dispositivo de memória.

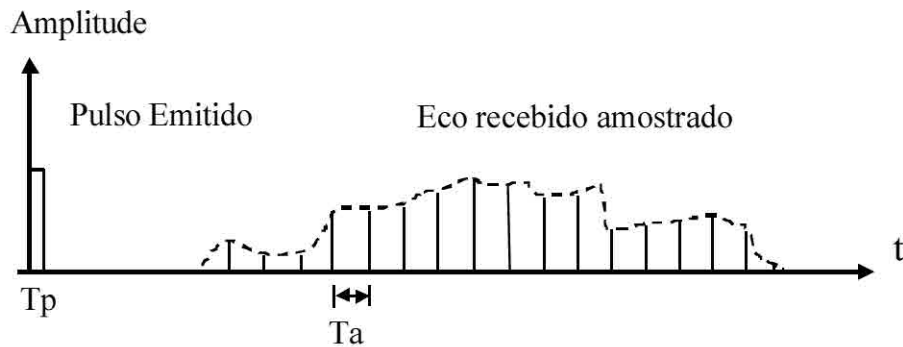


Fig. A1 - Ilustração do processo de amostragem dos dados de imagem.

O processo de amostragem faz com que a informação contida em cada intervalo, T_a , varie de tamanho conforme a variação de “range”, devido a variação do ângulo de incidência θ , ou seja, no “range” próximo à célula de resolução em “ground range” é maior que a do “range” distante, mas são iguais na projeção da imagem inclinada, como ilustrado na Figura A.2.

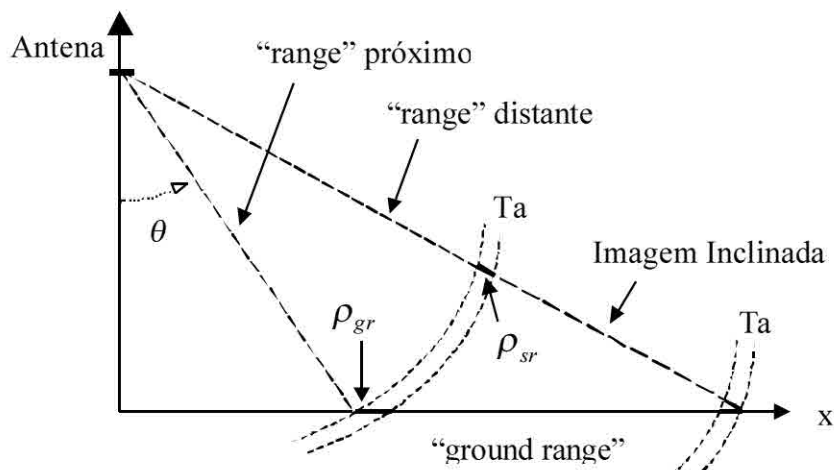


Fig. A.2 - Ilustração do conceito de imagem inclinada.

A imagem inclinada ou em “*slant range*”, possui uma distorção geométrica na direção de “*range*”, pois as amostras igualmente espaçadas na faixa imageada, ρ_{sr} , não são igualmente espaçados no chão, ρ_{gr} . Para que a imagem possa ser geocodificada, as amostras no chão devem ser igualmente espaçadas, para tanto, necessita-se converter a imagem de “*slant*” para “*ground range*”. A conversão consiste em projetar as amostras (pixels) no chão e depois reamostrá-las com um espaçamento uniforme. A conversão ideal é aquela que leva em conta o MNT, possibilitando a correção das distorções e a geração da orto-imagem SAR.

Devido à utilização de visada lateral pelos radares imageadores, ocorrem vários tipos de distorções nas imagens SAR (Curlander e McDonough, 1991), descritos a seguir:

Quando a inclinação local do terreno, α^+ , é menor que a do ângulo de incidência efetivo, θ_e , ocorre o **efeito de encurtamento de rampa**, “*foreshortening*”, ou seja, o segmento ab no solo é maior que o segmento ab na imagem inclinada, como ilustrado na Figura A.3.

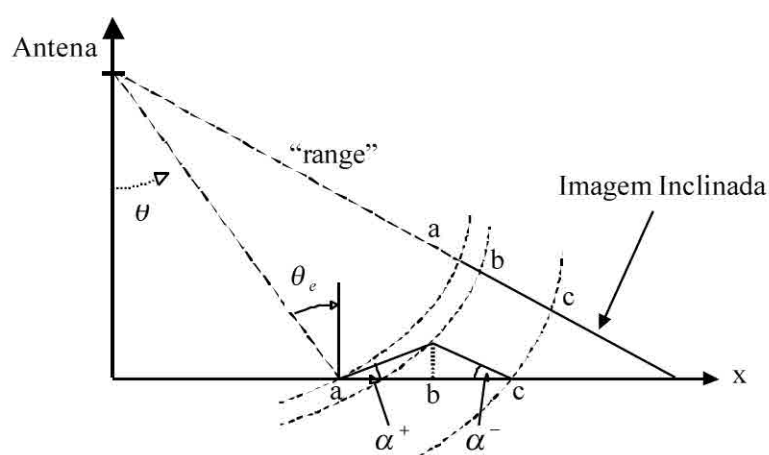


Fig. A.3 - Ilustração do encurtamento e alongamento de rampa.

Em áreas onde a inclinação do solo é contrária da direção do sensor, α^- , e menor que o ângulo de incidência efetivo, ocorre o **efeito de alongamento de rampa**, ou seja, o segmento bc pode ter até o mesmo comprimento que o segmento bc na imagem inclinada.

Quando o terreno local possui uma inclinação, α^+ , maior que o ângulo de incidência efetivo, θ_e , ocorre o **efeito de inversão**, “*layover*”. Este efeito é comum em áreas de relevos montanhosos. Isto ocorre quando o retorno do sinal do topo de uma montanha, ou construção, é amostrado antes do sinal de sua base, como ilustrado na Figura A.4, ou seja, houve uma inversão na posição de b na imagem inclinada. Nesse caso a imagem da montanha, ou construção, sofrerá grave distorção, o topo aparecerá mais próximo do que sua base.

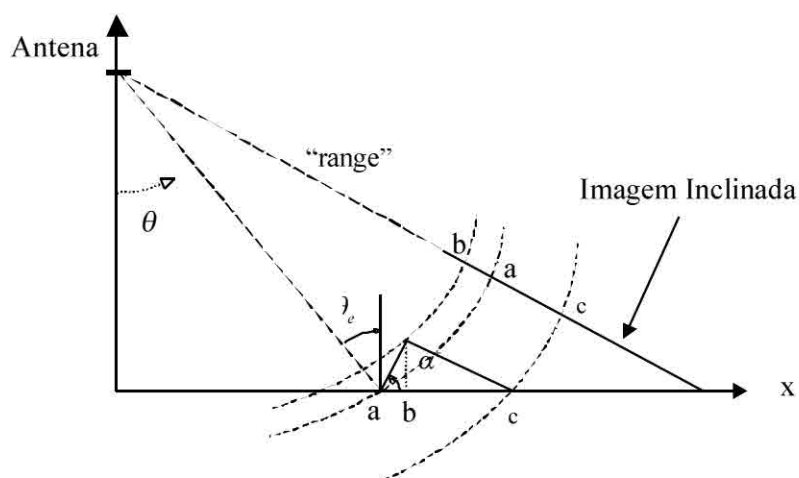


Figura A.4 - Ilustração do efeito de inversão.

Quando a inclinação do terreno na direção contrária do sensor, α^- , for igual ou maior que o ângulo de incidência efetivo, θ_e , ocorre o **efeito de sombra**, “*shadowing*”. Nesta condição não há imageamento no segmento bc, como ilustrado na Figura A.5.

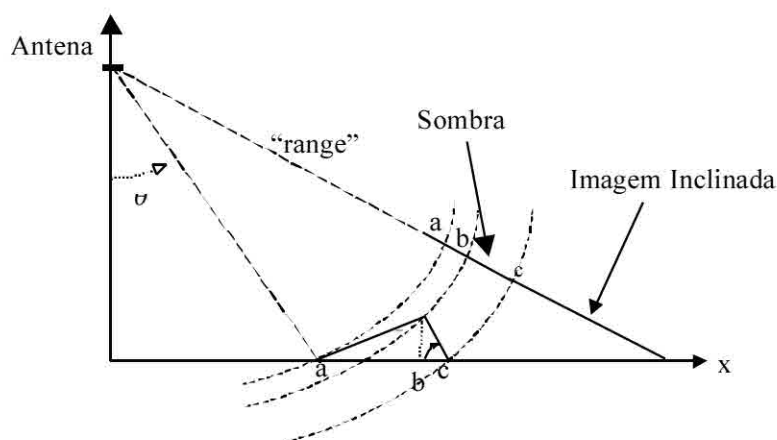


Fig. A.5 - Ilustração do efeito de sombra.

APÊNDICE B

CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DO SINAL SAR

O ruído “*speckle*” está associado a sistemas de imageamento coerente, tais como os obtidos por microondas, laser e ultra-sonografia. Para estes sensores, considera-se que em uma célula de resolução, existam um número muito grande de elementos difusores, aleatoriamente distribuídos, de tal forma que esses elementos possam interferir uns com os outros construtivamente e destrutivamente, fazendo aparecer variações súbitas na intensidade da imagem, caracterizando o ruído “*speckle*”, como ilustrado na Figura B.1

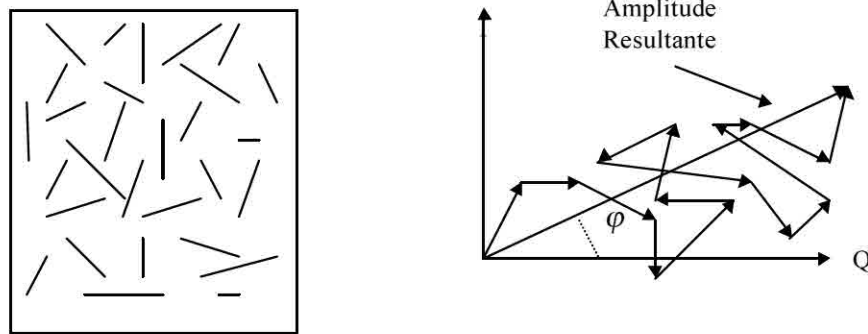


Fig. B.1 - Ilustração de uma célula de resolução e o “backscatter” resultante.

A presença do ruído “*speckle*” em imagens SAR, reduz a separabilidade entre classes e introduz ruídos de fase nas imagens. Existem basicamente dois métodos para se diminuir o ruído “*speckle*”, o processamento “*multi-look*” e a filtragem. Os filtros devem manter o valor médio do retorno do radar, “*backscatter*”, e preservar as bordas presentes na imagem, bem como as informações de textura (Sant’Anna, 1995).

O sinal de retorno do radar e suas propriedades estatísticas (Frost, et al., 1982), podem ser caracterizados da seguinte maneira:

Seja o retorno complexo do k -ésimo elemento difusor, dado por:

$$U_k = a_k \exp(i\varphi_k) = X_k + iY_k \quad (b.1)$$

onde: a_k representa a amplitude do sinal de retorno, “backscatter”, do elemento difusor e φ_k a sua fase, ou X_k representando a parte real e Y_k a parte imaginária do retorno.

A cada pulso emitido a inclinação dos elementos difusores mudam em relação ao sensor SAR (antena), provocando uma variação aleatória em a_k e φ_k . Os vários pulsos constituem um “espaço amostral” estatístico.

É razoável aceitar as seguintes hipóteses:

- (i) φ_k varia uniformemente entre 0 a 2π .
- (ii) $a_k, \varphi_k, a_{k'},$ e $\varphi_{k'}$ são estatisticamente independentes para $k \neq k'$.

O retorno complexo resultante de uma célula de resolução da imagem, é dado por:

$$U = \sum_k a_k \exp(i\varphi_k) = X + iY \quad (b.2)$$

Pelo Teorema Central do Limite, e sob certas condições, chega-se que (X, Y) possui uma distribuição Gaussiana bivariada, dada por:

$$p_G(X, Y) = \frac{1}{2\pi a^2} \exp\left(-\frac{X^2 + Y^2}{2a^2}\right) \quad (b.3)$$

onde $a^2 = \left\langle \sum_{k=1}^N X_k^2 \right\rangle = \left\langle \sum_{k=1}^N Y_k^2 \right\rangle = \frac{I}{2}$, e I representa a intensidade média da imagem.

A notação $\langle f \rangle$ indica a esperança da variável f .

A amplitude $V = \sqrt{X^2 + Y^2}$ obedece a distribuição de Rayleigh, representada por $\mathfrak{R}(V)$, e dada por:

$$p_{\mathfrak{R}}(V) = \frac{2V}{I} \exp\left(-\frac{V^2}{I}\right) \quad (b.4)$$

O primeiro momento, $\langle V \rangle$, o segundo, $\langle V^2 \rangle$, e o desvio padrão, σ , são dados por:

$$\begin{aligned}\langle V \rangle &= \frac{\sqrt{\pi I}}{2}, \\ \langle V^2 \rangle &= I, \\ \sigma &= \sqrt{(1 - \pi / 4)I}\end{aligned}\tag{b.5}$$

No caso de imagens “multi-look” (n looks), a amplitude do sinal possui uma distribuição Raiz Quadrada da Gamma, representada por, $\Gamma^{1/2}(V, n)$, e dada por

$$p_r(V) = \frac{2n^n V^{2n-1}}{I \cdot \Gamma(n)} \cdot \exp\left(-\frac{nV^2}{I}\right)\tag{b.6}$$

onde $\Gamma(.)$ é a função Gamma.

Imagens com ruído “speckle” não devem ser tratadas com algoritmos usuais que utilizam modelo de ruído aditivo, como o filtro de Wiener (Kay, 1993) por exemplo, uma vez que o “speckle” corrompe o sinal de uma maneira multiplicativa (Frery et al., 1995). Dessa maneira as distribuições da amplitude da imagem e da intensidade não são Gaussianas.

O modelo multiplicativo é muito comum, para explicar o comportamento estatístico de dados obtidos por iluminação coerente (Yanasse et al., 1995). Supõe-se que o processo de aquisição da imagem, são eventos de produto de duas variáveis aleatórias independentes, S e N , onde S modela a reflectância do terreno e N modela o ruído “speckle”. O valor observado U é um evento de variável aleatória definida pelo produto $U = S \cdot N$.

A distribuição de S pode ser modelada como sendo uma constante, k_p , para áreas homogêneas da imagem, e como uma distribuição Raiz Quadrada da Gamma, $\Gamma^{1/2}$, (no caso de imagens de amplitude) para áreas heterogêneas.

A Tabela B.1 mostra as distribuição do dado observado (U), da reflectância (S) e do ruído (N), para imagens de amplitude de um “look” e “multi-look”.

TABELA B.1 - DISTRIBUIÇÕES PARA IMAGENS DE AMPLITUDE.

Área	No. de “look”	Reflectância (S)	Ruído (N)	Retorno (U)
Homogênea	1	$\sqrt{k_p}$	$\Re(1)$	$\Re(k_p)$
Heterogênea	1	$\Gamma^2(\alpha_p, \lambda_p)$	$\Re(1)$	$\kappa_A(\alpha_p, \alpha_p/\lambda_p, 1)$
Homogênea	n	$\sqrt{k_p}$	$\Gamma^{1/2}(n, n)$	$\Gamma^2(n, n/k_p)$
Heterogênea	n	$\Gamma^2(\alpha_p, \lambda_p)$	$\Gamma^{1/2}(n, n)$	$\kappa_A(\alpha_p, \alpha_p/\lambda_p, n)$

onde k_p é uma constante, $\Gamma^{1/2}$ é a distribuição Raiz Quadrada da Gamma, $\Re$ é a distribuição de Rayleigh e κ_A a distribuição κ para amplitude, dada por:

$$p_\kappa(V) = \frac{4\sqrt{\alpha_p n}}{I\Gamma(\alpha_p)\Gamma(n)} \left(V \sqrt{\frac{\alpha_p n}{I}} \right)^{\alpha_p + n - 1} \kappa_{\alpha_p - n} \left(2V \sqrt{\frac{\alpha_p n}{I}} \right) \quad (b.7)$$

onde $I = \langle V^2 \rangle = \alpha_p / \lambda_p$, $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma, e $\kappa_v(\cdot)$ é a função de Bessel modificada do terceiro tipo e de ordem v .

Os parâmetros k_p, α_p e λ_p são relativos ao alvo imageado e que podem ser estimados a partir dos dados observados (U), usando inferência estatística. Estes parâmetros informam sobre propriedades importantes do alvo iluminado (reflectância, rugosidade, etc.) e podem ser usados para ajudar tanto na análise visual como na análise automática das imagens.

APÊNDICE C

FONTES DE ERROS EM SISTEMAS InSAR

Basicamente as fontes de erros que degradam a qualidade do MNT, podem ser divididas em duas categorias, a primeira fonte de erros é devida a **erros de posicionamento**, ou seja, incertezas associadas a atitude da plataforma e erros na determinação de linha-base, no caso de plataforma orbital; a segunda fonte é devida a **erros associados à fase**, formada pelas principais contribuições: ruído térmico, ruído “*speckle*”, erros de processamento durante a geração das imagens, erros de registro das imagens, descorrelação das imagens provocada pela diferente geometria de aquisição das imagens e a descorrelação temporal das imagens, no caso de duas passagens.

A influência dos erros de posicionamento e de fase, na elevação do terreno, foi derivada para cada parâmetro.

C.1 - Erros de Posicionamento

Os erros de posicionamento provocam **erros sistemáticos**, ou seja, os pontos do Modelo de Elevação apresentam erros comuns (Li e Goldstein, 1990). Os principais erros de posicionamento são:

A **Incerteza na medida de “range”**, σ_r , é causada pelo desvio na frequência de amostragem dos dados e variação no atraso de propagação do sinal do radar, devido a mudanças na ionosfera. Esta incerteza provoca um desvio σ_z^r na elevação, ou seja:

$$\sigma_z^r = \sigma_r \cos \theta \quad (c.1)$$

onde θ é o ângulo de incidência.

A **Incerteza na determinação da altura da antena** de referência, σ_H , provoca o seguinte desvio direto na elevação:

$$\sigma_z^H = \sigma_H \quad (c.2)$$

Em **sistema de duas passagens**, as componentes vertical e horizontal da linha-base, necessitam ser determinadas, para isso, é muito importante saber o ângulo que a linha-base forma com a horizontal. Uma variação pequena neste ângulo, afeta diretamente o conhecimento da inclinação da superfície. Os erros em termos das componentes da linha-base, derivados por Zebker et al. (1994), são apresentados a seguir.

A *Incerteza na determinação da componente vertical da linha-base*, σ_{B_z} , provoca o seguinte desvio na elevação :

$$\sigma_z^{B_z} = \frac{r \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{B_n} \sigma_{B_z} \quad (c.3)$$

A *Incerteza na determinação da componente horizontal da linha-base*, σ_{B_y} , provocando o seguinte desvio na elevação:

$$\sigma_z^{B_y} = \frac{r \cdot (\sin\theta)^2}{B_n} \sigma_{B_y} \quad (c.4)$$

Nos **sistemas de uma passagem** aerotransportado, o *rolamento da aeronave* é a principal fonte de erro, segundo Zebker et al. (1992), pois afeta diretamente o conhecimento da inclinação da superfície. Os sistema interferométricos aerotransportadas necessitam de uma boa compensação de movimento. A *influência do rolamento* da aeronave na incerteza da elevação , σ_z^θ , é dada por:

$$\sigma_z^\theta = r \cdot \sin\theta \cdot \sigma_\theta \quad (c.5)$$

onde σ_θ é o desvio padrão do ângulo de incidência, devido ao rolamento da aeronave e “r” a distância inclinada.

C.2 Erros na Fase Interferométrica

Erros na fase interferométrica provocam erros no Modelo de Elevação.

A incerteza associada a erros na fase, σ_ϕ , provoca o seguinte desvio na elevação, σ_z^ϕ , segundo Li e Goldstein (1990):

$$\sigma_z^\phi = \frac{\lambda r \cdot \sin \theta}{4\pi B_n} \sigma_\phi \quad (c.6)$$

onde σ_ϕ representa o desvio relativo a erros de fase, r representa a distância entre a antena principal e um ponto genérico no solo, θ representa o ângulo entre o nadir e o vetor r , e B_n representa a linha-base normal, definida pela seguinte equação:

$$B_n = B_h \cos \theta + B_v \sin \theta \quad (c.7)$$

onde B_h representa a linha-base horizontal, e B_v a linha-base vertical.

As principais fontes de erros de fase são apresentados a seguir:

O “**offset**” de fase, associado principalmente a célula de resolução do radar, que normalmente é bem maior que o comprimento de onda do sinal transmitido, provoca erro sistemático no MNT.

O **ruído térmico**, associado ao receptor do sistema radar, é um ruído aditivo. Normalmente os radares imageadores, são construídos de maneira que a fonte de ruído térmico seja baixa em relação ao sinal recebido, ou seja, com uma alta relação Sinal/Ruído. Contudo, em regiões escuras da imagem, de baixa relação Sinal/Ruído, o ruído aumenta, degradando a fase interferométrica (interferograma).

A coeficiente de correlação entre as imagens, segundo Zebker e Villasenor (1992), supondo que a relação Sinal/Ruído seja a mesma para as duas imagens, é dado por:

$$\gamma_{term} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (c.8)$$

O **Ruído “speckle”**, é um ruído associado a sistemas de imageamento coerente, de frequência única, é um ruído multiplicativo. Na caracterização do ruído “speckle”, considera-se que em uma célula de resolução de uma cena imageada, existam um número muito grande de elementos difusores, aleatoriamente distribuídos na célula. A soma coerente dos elementos difusores, possui média zero, distribuição complexa Gaussiana e variância proporcional a seção transversal média do radar na superfície. As variações súbitas na intensidade da imagem, caracterizam o ruído “speckle”.

A **des correlação devida à linha-base**, acontece quando se combina os pixels de duas imagens adquiridas com geometrias ligeiramente diferentes, para se extrair a diferença de fase. O coeficiente de correlação entre as duas imagens, segundo Zebker e Villasenor (1992), é dada por:

$$\gamma_B = 1 - \frac{2 \cdot B_n \cdot \rho_{sr} \cos^2 \theta}{\lambda \cdot r} \quad (c.9)$$

onde ρ_{sr} é a resolução na direção de “range” e B_n a linha-base normal.

Na equação c.9, considerou-se somente a direção de “range, supondo-se que a linha-base não varia durante a aquisição das imagens, o que acontece na maioria dos casos, quando se utiliza duas passagens.

Nota-se na equação c.9, que a medida que a linha-base cresce, a correlação decresce, aumentando o ruído na fase. Existe uma **linha-base crítica** (Zebker e Villasenor, 1992), onde a partir de um certo valor a correlação cai para zero, esse valor é dado por:

$$B_c = \frac{\lambda r}{2 \cdot \rho_{sr} \cos^2 \theta} \quad (c.10)$$

A equação c.8 mostra que quanto menor for a linha-base, maior será a correlação entre as duas imagens utilizadas, contudo, segundo a equação c.6, a incerteza no cálculo da elevação aumenta com a diminuição da linha-base. Além disso, uma linha-base muito pequena afeta a sensibilidade do sistema interferométrico, fazendo com que o ruído térmico tenha uma influência grande na degradação da precisão da elevação.

Portanto, na escolha da linha-base, há um **compromisso** entre ser **suficientemente pequena**, para que se tenha uma boa sensibilidade a inclinação da superfície e alta correlação entre as imagens, e uma linha-base **suficientemente grande** para que se tenha um erro de elevação aceitável.

Em sistemas orbitais de duas passagens, a linha-base depende da distância entre as duas órbitas, e isto, nem sempre pode ser escolhido. Normalmente para estes sistemas (Seasat, ERS-1, ERS-2, JERS-1 e Radarsat) tem-se utilizado o que existe disponível, dentro de uma linha-base aceitável.

A **descorrelação temporal**, é um importante fator de decréscimo da correlação entre as imagens, utilizadas na geração do interferograma. A descorrelação temporal ocorre em sistemas de duas passagens, devido às mudanças físicas na superfície imageada, no intervalo de tempo entre as aquisições.

A correlação entre as imagens, em termos do movimento médio quadrático da superfície imageada, foi verificada por Zebker e Villasenor (1992), e dada por:

$$\gamma_t = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \left(\sigma_{my}^2 \sin^2 \theta + \sigma_{mz}^2 \cos^2 \theta \right) \right\} \quad (c.11)$$

onde σ_{my}^2 e σ_{mz}^2 são respectivamente, o movimento médio quadrático horizontal e vertical a superfície.

Os **erros de processamento**, são devidos aos erros introduzidos durante a geração da imagem SAR interferométrica, e no processo de registro das imagens. Esses erros foram modelados por Just e Bamler (1994), pelo seguinte coeficiente de correlação:

$$\gamma_p = \frac{1}{B_p \cdot B_a} \int_{-B_r/2}^{B_r/2} \int_{-B_a/2}^{B_a/2} \exp(i\varepsilon_p) dr da \quad (c.12)$$

onde B_p é o largura de banda do pulso transmitido, “*chirp*”, B_a a variação de frequência em azimuth, devido ao efeito Doppler, e ε_p é o erro de fase devido ao processamento, composto pelas seguintes componentes:

ε_{00} é o erro de fase constante.

ε_{10} é o erro de registro na direção de azimuth.

ε_{11} é o erro de registro na direção de “*range*”.

ε_{20} é o erro de focalização do processador SAR na direção de azimuth.

ε_{02} é o erro de focalização do processador SAR na direção de “*range*”.

ε_{12} é o erro de compensação da migração linear em “*range*”.

ε_{21} é o erro de compensação da migração quadrática em “*range*”.

C-3 Caracterização Estatística do Ruído de Fase

O interferograma é composto de duas partes: a fase induzida pela geometria e elevação, que carrega a informação útil, e os distúrbios provocados por ruídos. Supondo que a fase devida a geometria e elevação possa ser retirada, a **função densidade de probabilidade do ruído** no interferograma, segundo Just e Bamler (1994), é dada por:

$$f_{dp}(\phi) = \frac{1-|\gamma|^2}{2\pi} \frac{1}{1-|\gamma|^2 \cos^2(\phi - \phi_o)} \left\{ 1 + \frac{|\gamma| \cos(\phi - \phi_o) \arccos[-|\gamma| \cos(\phi - \phi_o)]}{[1-|\gamma|^2 \cos^2(\phi - \phi_o)]^{3/2}} \right\} \quad (c.13)$$

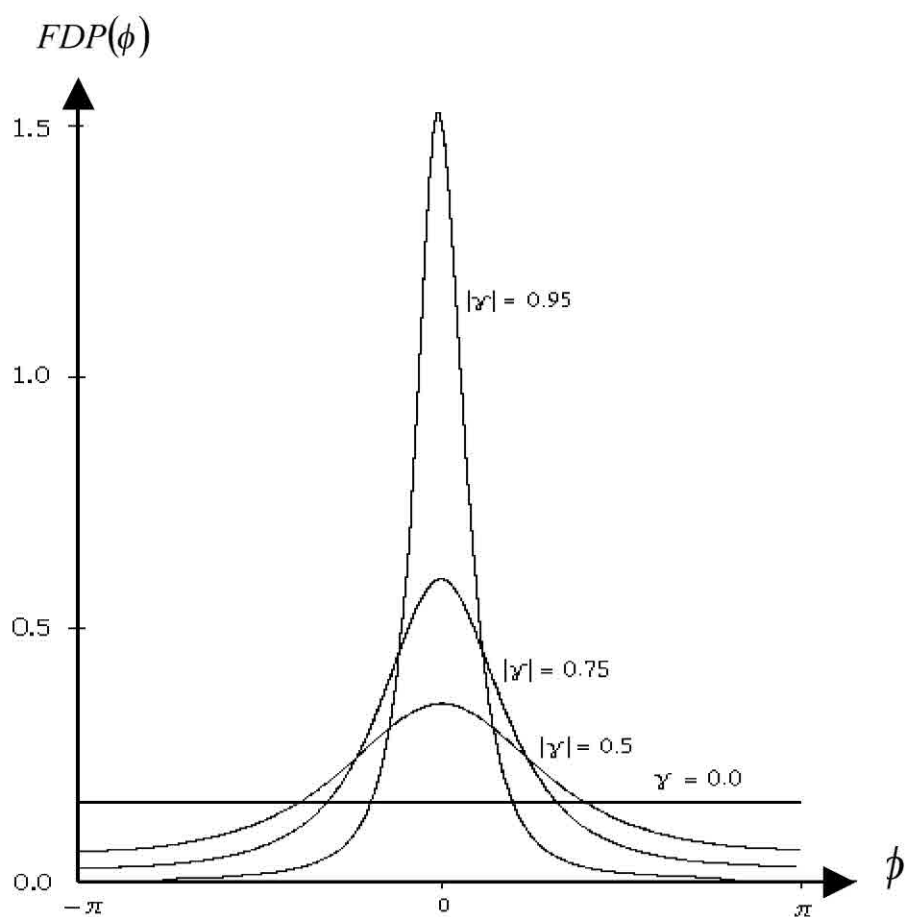
onde γ é o coeficiente de correlação complexo, descrito no item 2.2.5, e ϕ_o o argumento desse coeficiente complexo.

O **valor médio** e a **variância** desta distribuição (Just e Bamler, 1994), são dados respectivamente por:

$$E\{\phi\} = \arg.\gamma = \phi_o \quad (c.14)$$

$$\sigma_\phi^2 = E\{(\phi - \phi_o)^2\} = \int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 f_{dp}(\phi + \phi_o) d\phi \quad (c.15)$$

A Figura c.1 apresenta a função densidade de probabilidade, $f_{dp}(\phi)$, para quatro valores de magnitude do coeficiente de correlação complexa, $|\gamma|$, e $\phi_0 = 0$. Nota-se que a função densidade de probabilidade é uniforme, $f_{dp}(\phi) = 1/2\pi$, quando os sinais estão completamente descorrelacionados, $|\gamma| = 0$, e tende para uma função delta quando a correlação é total, $|\gamma| = 1$.



Ref. [Just e Bamler-1994]

Fig. c.1 - Distribuição da função densidade de probabilidade da fase, para diferentes valores do módulo do coeficiente de correlação complexo.

APÊNDICE D

INCLINAÇÃO LIMITE DE SUPERFÍCIE

Uma das limitações do sistema interferométrico SAR, é a máxima inclinação da superfície que o sistema consegue medir sem ambigüidade. A maior variação de fase que o sistema pode medir, sem ambigüidade, entre duas amostras é π . Quando se tem uma rampa muito inclinada na superfície, essa diferença é maior que π , caracterizando uma sub-amostragem na fase.

A máxima inclinação da superfície que o sistema suporta, segundo Hagberg e Ulander (1993), é dada pelo seguinte ângulo em relação a superfície plana:

$$\beta_s \arctan\left(\frac{\lambda r \sin \theta}{4S_a B_n}\right) \quad (d.1)$$

onde λ é o comprimento de onda do sinal transmitido, S_a é o espaçamento entre pixels no solo e B_n é a componente normal da linha-base, Figura D.1, definida por:

$$B_n = B_h \cos \theta + B_v \sin \theta \quad (d.2)$$

onde B_h representa a linha-base horizontal, e B_v a linha-base vertical.

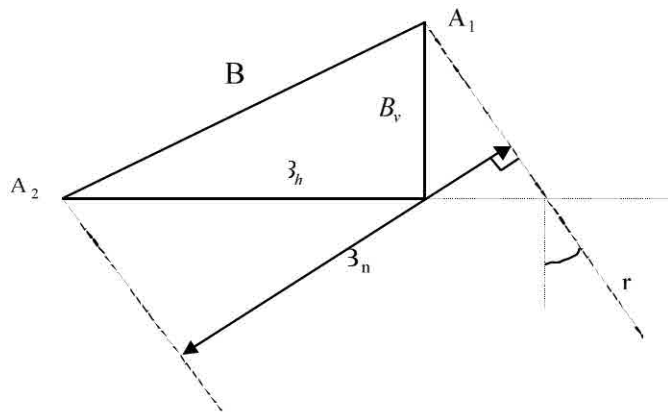


Fig. D.1 - Componentes vertical, horizontal e normal da linha-base.

Nota-se na equação d.1, que o ângulo de inclinação limite varia através da faixa imageada, dependendo do ângulo de incidência, ou seja, o valor limite é maior no final da faixa. Além disso, quanto menor a linha-base ou menor o espaçamento entre pixels, maior será a inclinação limite. Sistemas que trabalham com frequências mais baixas, λ_T maior, são melhores para regiões com inclinações mais acentuadas.

APÊNDICE E

GEOCODIFICAÇÃO SAR INVERSA

A geocodificação SAR inversa parte de um ponto de coordenada cartesiana conhecida e chega, de maneira interativa, à correta posição do pixel na imagem de geometria inclinada, ou seja, em “*slant range geometry*”, conforme ilustrado na Figura E.1.

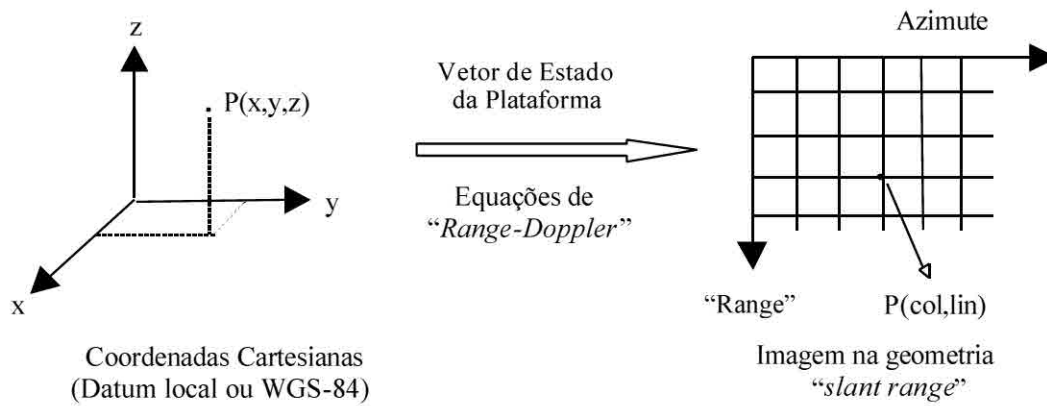


Fig. E.1 - Ilustração do processo de geocodificação inversa.

A formulação de “*range-Doppler*” para geodificação SAR, descrita no item 2.3, é também utilizada na geodificação inversa. As equações de “*Doppler-shift*” e a equação de “*range*” devem ser resolvidas simultaneamente para se obter a posição da linha e coluna do pixel na imagem inclinada. A primeira equação determina o desvio de frequência Doppler do ponto em questão, e a outra descreve a dependência de “*slant range*” entre o sensor e a localização do ponto (Kwork e Curlander, 1987).

Para geodificação SAR inversa, segundo Roth et al (1993), a equação de desvio de frequência Doppler é dada por:

$$F_1(i, j) = f_D - \frac{(\bar{p} - \bar{s})(\bar{v}_p - \bar{v}_s)}{|\bar{p} - \bar{s}|} \frac{2}{\lambda} = 0 \quad (e.1)$$

Onde ‘i’ representa a coordenada em azimuth, ou a localização de coluna na imagem, ‘j’ representa a coordenada em “range”, ou a localização de linha na imagem, f_{DC} a frequência de “Doppler-shift”, $\vec{p}$ o vetor posição de um ponto no solo, $\vec{s}$ o vetor posição da antena, e $\vec{v}_p$ e $\vec{v}_s$, os vetores de velocidade do sensor e do ponto em relação a Terra, como ilustrado na Figura E.2.

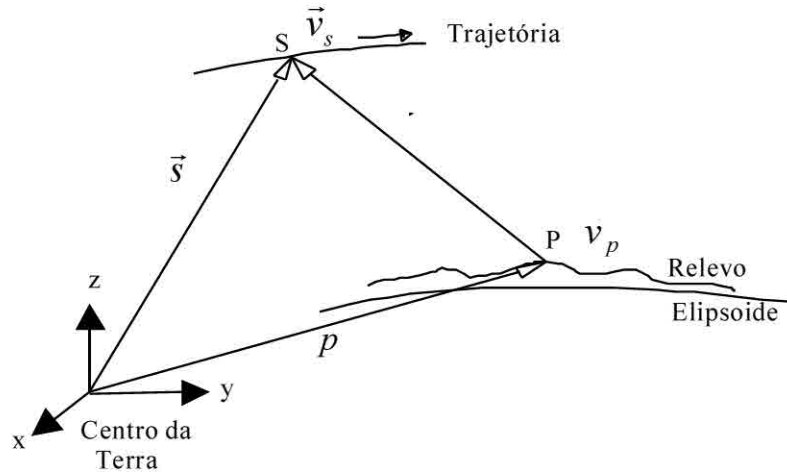


Fig. E.2 - Representação dos vetores de posição e velocidade do sensor e do ponto P analisado.

Enquanto f_D varia ao longo das direções de azimuth e “range”, a localização e velocidade do sensor, que formam o vetor de estado, variam com o tempo. Como a distância de azimuth é função do tempo, o vetor de estado pode ser considerado uma função dependente da localização do pixel em azimuth.

O “Doppler-shift” pode ser aproximado por um polinômio, dependente de azimuth e range, ou seja:

$$f_D = d_0 + d_1 \cdot j + d_2 \cdot j^2 + d_3 \cdot i + d_4 \cdot i^2 \quad (e.2)$$

O vetor posição do sensor pode ser aproximado também por polinômios, dependente de azimuth, da seguinte forma:

$$\vec{s} = \begin{cases} x_s = a_0 + a_1.i + a_2.i^2 + a_3.i^3 \\ y_s = b_0 + b_1.i + b_2.i^2 + b_3.i^3 \\ z_s = c_0 + c_1.i + c_2.i^2 + c_3.i^3 \end{cases} \quad (e.3)$$

Os coeficientes dos polinômios devem ser determinados em uma etapa anterior ao algoritmo de geocodificação inversa.

Para geodificação SAR inversa , segundo Roth et al (1993), a equação de “range” é dada por:

$$F_2(i, j) = r_0 - m_r.j - |\vec{p} - \vec{s}| \quad (e.4)$$

Onde r_0 e m_r são constantes relacionadas ao “range” inicial da faixa, e a amostragem da imagem na direção de “range”, respectivamente.

A equação e.4 descreve a dependência linear da distância entre o sensor e a localização do ponto na Terra, para uma determinada distância em azimuth, ou seja, para um dado ‘i’ . Como o vetor posição do sensor depende de azimuth, ou seja, de ‘i’ , F_2 é função de ambas as variáveis ‘i’ e ‘j’.

Ambas as equações e.1 e e.4 são não lineares em relação as variáveis ‘i’ e ‘j’, portanto é impossível resolver o sistema de equações diretamente, necessitando para isso de métodos iterativos, tais como o método de Newton, o método de Broyden, etc... (Press e Flannery, 1992).

APÊNDICE F

CONCEITO DE RESOLUÇÃO ESPACIAL LOCAL

O sinal de retorno do radar, depende fortemente do ângulo de incidência local, ou seja, do ângulo em que a direção da frente de onda faz com a normal da superfície. Quando o ângulo de incidência local for muito pequeno, tem-se um brilho intenso na imagem SAR, pois a resolução espacial local é maior, retornando com isso mais energia para radar. Esta situação é encontrada em áreas bem próximas das regiões de inversão.

Esta situação se inverte quando o ângulo for muito grande, pois neste caso, a resolução espacial local é menor, retornando com isso menos energia para radar, produzindo um baixo brilho na imagem SAR. Esta situação é encontrada em áreas bem próximas das regiões de sombra.

O mapa de resolução espacial quantifica a área efetiva de cada pixel da imagem, baseado no modelo de elevação (Holecz et al, 1993), ou seja, toma-se a derivada no modelo de elevação na posição do pixel correspondente na imagem, nas direções de “range” e azimuth, e determina-se a resolução espacial. O mapa de resolução espacial auxilia a correção das distorções radiométricas das imagens SAR, provocadas pela topografia do terreno. As Figuras F.1 (a) e Figura F.1 (b) ilustram a resolução local em “range” e em azimuth, respectivamente.

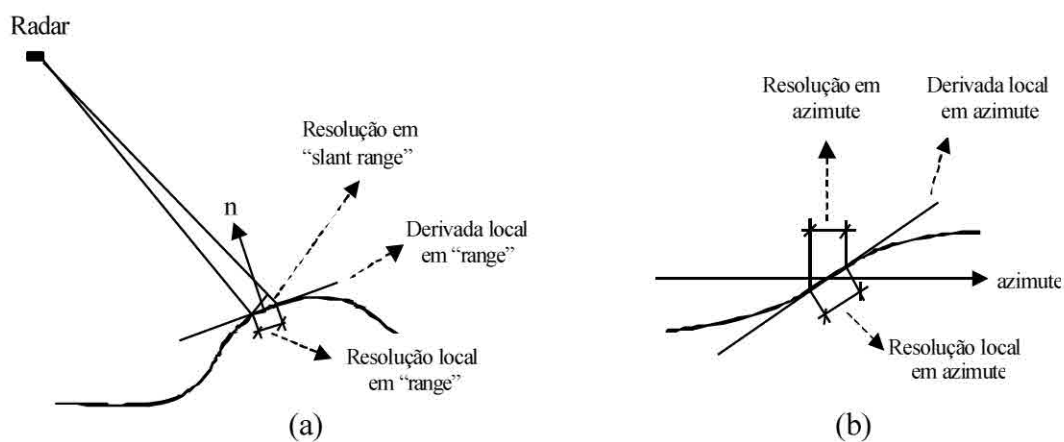


Fig. F.1 – Ilustração de resolução espacial local.

APÊNDICE G

CORREÇÃO DE PADRÃO DE ANTENA

Variações de baixa frequência no brilho das imagens, na direção de “range” são causados principalmente pela perda de potência relacionada com a geometria de visada lateral, que decai com $1/r^3$ no caso das imagens SAR, onde ‘r’ é a distancia entre a antena e um dado ponto na imagem.

Esse problema é mais acentuado em imagens adquiridas por avião, pois a razão entre o $r_{\min}$, no início da faixa imageada, e $r_{\max}$, no fim da faixa, é bem menor em relação as adquiridas por satélites, onde a razão é praticamente 1, Figura G.1.

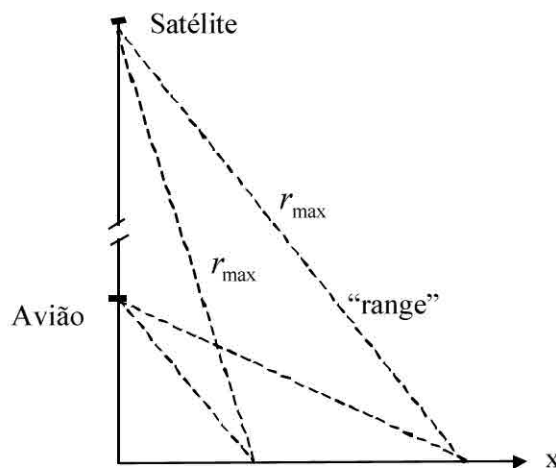


Fig. G.1 - Variação do “range” para aeronave e satélite.

Esta perda de potência é corrigida no instante da aquisição do eco de cada pulso, através do STC (“*Sensitivity Time Control*”), visando a correção do decaimento da potência. Devido a imperfeição no sistema STC ou outras perturbações na eletrônica do radar, a correção não é perfeita, permanecendo alguma variação residual.

O objetivo da Correção do Padrão de Antena é criar uma imagem que tenha uma média uniforme nos níveis de cinza na direção de “range”. O algoritmo consiste em gerar um ‘padrão’ através da média das colunas da imagem.

O ‘padrão’ obtido através da média deve ser ajustado por um polinômio, para que se retire as flutuações de alta frequência, permanecendo somente as flutuações de baixa frequência. O ‘padrão’ ajustado pode então ser utilizado para a correção da flutuação.

Um método comum de correção é o multiplicativo, que consiste em multiplicar o valor de cada pixel, $V_p(i,j)$, por um fator dado pela razão entre o valor médio do ‘padrão’, $\bar{P}$, e o valor do ‘padrão’ ajustado, $P(j)$, correspondente da coordenada do pixel, ou seja:

$$V_c(i,j) = V_p(i,j) \cdot \frac{\bar{P}}{P(j)} \quad (g.1)$$

onde j é o índice de coluna da imagem, correspondente a direção de “range”.

APÊNDICE H

ESTIMATIVA DO NÚMERO DE PONTOS PARA GERAÇÃO DAS FUNÇÕES DE “OFFSET” DE FASE

Para se ter uma estimativa sobre o número de pontos a ser utilizado para a geração do conjunto de funções de “*offset*” de fase, realizou-se uma experiência de simulação estocástica, onde utilizou-se um par de interferogramas de uma área acidentada.

Este par de interferogramas foi escolhido devido a suas características ruidosas, caracterizado pela presença de regiões de sombra e inversão, cobertura vegetal e ruído “*speckle*”. Com isso procurou-se obter a estimativa do número de pontos, para a geração do conjunto de funções, em uma área considerada como ‘pior caso’.

Espera-se que em áreas menos ruidosas, o número de pontos estimado nesta simulação, seja totalmente satisfatório. A Figura H.1 ilustra as duas imagens de coerência correspondentes à duas aquisições, utilizadas na simulação. As regiões escuras correspondem as regiões de baixa coerência, ou seja, onde existe a presença de ruído de fase. Nesta simulação foram considerados apenas os pontos onde o fator de coerência fosse maior que 0.5.

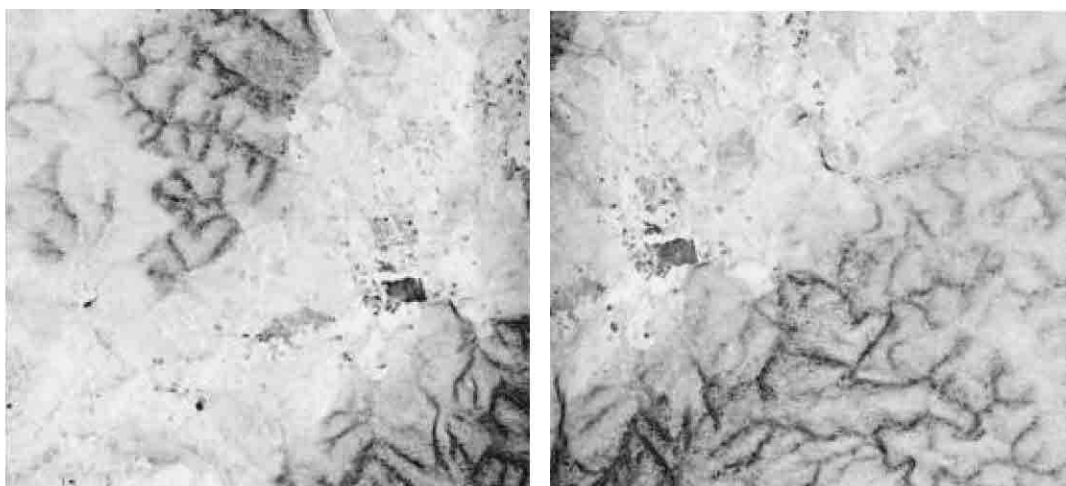


Fig. H.1 - Imagens de coerência das duas aquisições utilizadas na simulação.

A Tabela H.1 apresenta os resultados da simulação. Os pontos foram escolhidos de maneira aleatória a cada teste, na região de sobreposição. A cada teste, ou seja, a cada realização, variou-se o número de pontos para verificar a influência deste número nos valores de “*offset*” de fase.

TABELA H.1 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Teste	“ <i>offset</i> ”	Número de pontos utilizados						
		10	20	30	40	60	80	100
1	Off1	8.685	8.683	8.724	8.755	8.731	8.729	8.716
	Off2	15.229	15.160	15.203	15.254	15.212	15.224	15.219
2	Off1	8.679	8.680	8.726	8.757	8.738	8.716	8.712
	Off2	15.210	15.173	15.224	15.227	15.224	15.211	15.213
3	Off1	8.701	8.719	8.768	8.739	8.727	8.725	8.724
	Off2	15.169	15.209	15.210	15.162	15.209	15.230	15.213
4	Off1	8.705	8.715	8.781	8.772	8.749	8.748	8.746
	Off2	15.212	15.234	15.271	15.242	15.214	15.212	15.228
5	Off1	8.927	8.906	8.770	8.744	8.720	8.725	8.720
	Off2	15.439	15.407	15.362	15.239	15.240	15.233	15.237
6	Off1	8.740	8.681	8.655	8.687	8.717	8.719	8.718
	Off2	15.267	15.208	15.165	15.205	15.215	15.229	15.220
7	Off1	8.835	8.824	8.795	8.745	8.717	8.748	8.741
	Off2	15.367	15.326	15.303	15.257	15.249	15.258	15.254
8	Off1	8.776	8.752	8.705	8.720	8.748	8.725	8.729
	Off2	15.377	15.321	15.263	15.259	15.251	15.254	15.220
9	Off1	8.643	8.703	8.728	8.741	8.712	8.715	8.712
	Off2	15.170	15.332	15.273	15.249	15.207	15.222	15.209
10	Off1	8.708	8.700	8.766	8.751	8.745	8.749	8.746
	Off2	15.194	15.152	15.266	15.229	15.237	15.235	15.240

As Figuras H.2 e H.3 ilustram o comportamento do “*offset*” de fase dos interferogramas, correspondente às duas aquisições. Nota-se que a dispersão dos valores de “*offset*” diminui a partir de 60 pontos, bem como a estabilização do valor médio, em ambos os casos.

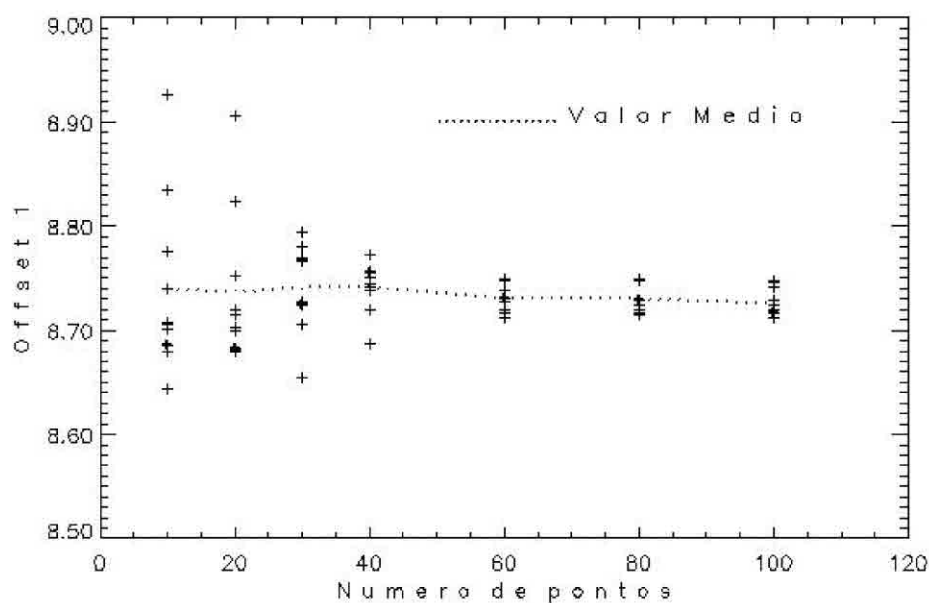


Fig. H.2 – Valores de “*offset*” de fase da primeira aquisição.

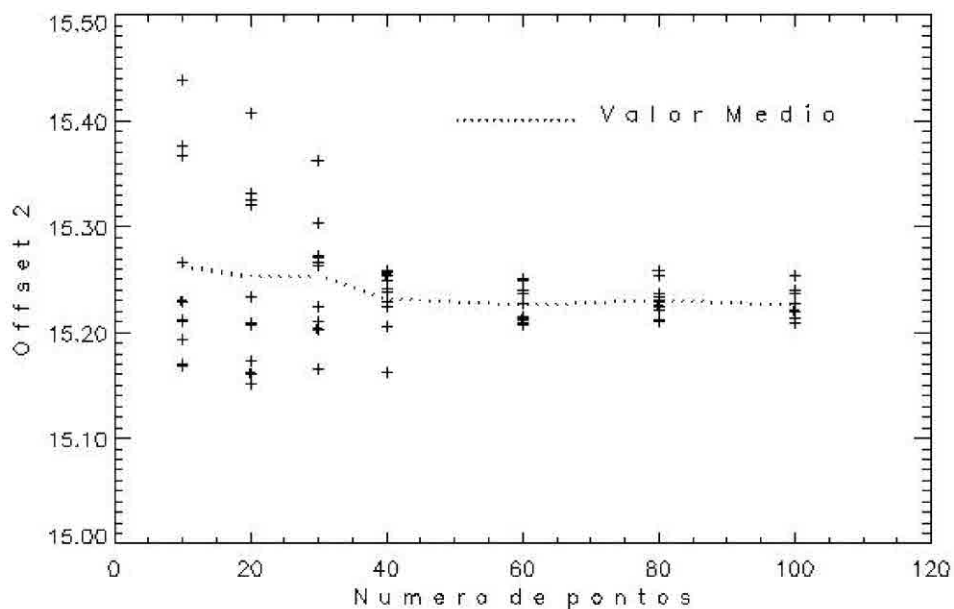


Fig. H.3 – Valores de “*offset*” de fase da segunda aquisição.

A Figura H.4 ilustra os valores de desvio padrão dos valores de “*offset*” de fase, correspondentes às duas aquisições, em relação ao número de pontos utilizados.

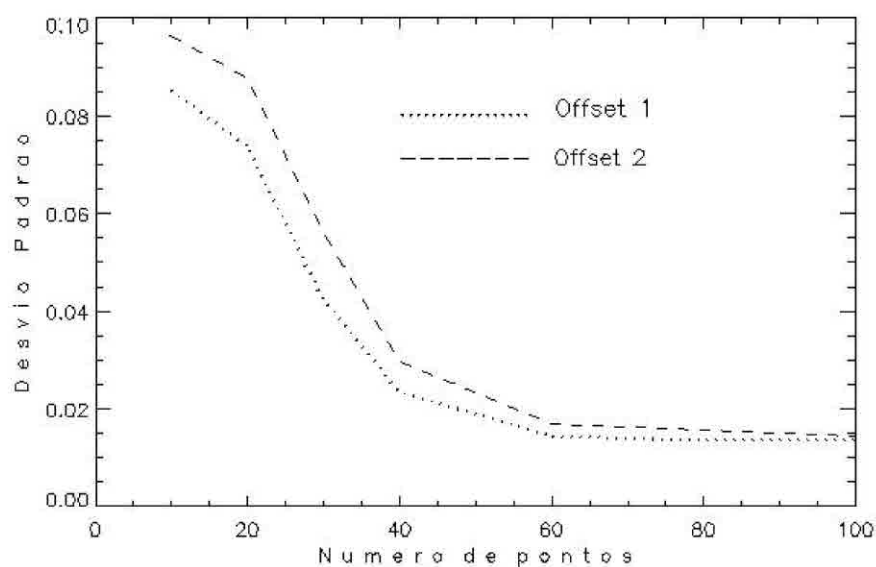


Fig. H.4 – Ilustração do desvio padrão dos “*offset*” de fase em relação ao número de pontos utilizados.

A Figura H.5 apresenta os tempos de processamento efetivo para a geração das funções de “*offset*” de fase, em relação aos números de pontos utilizados

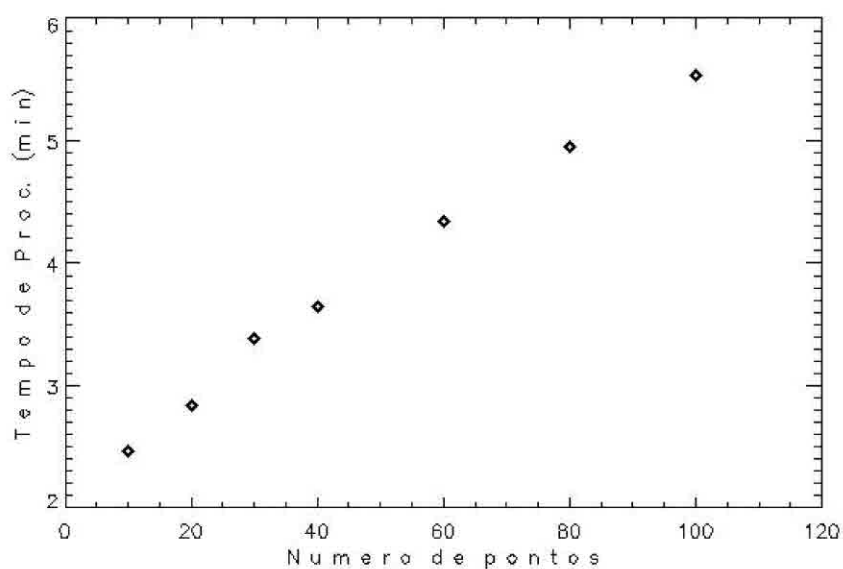


Fig. H.5 – Ilustração dos tempos de processamento efetivo das funções.

Baseados nos resultados da simulação, nota-se através das Figuras H.2 e H.3 e H.4, que a dispersão dos valores de “*offset*” diminui e a média estabiliza-se, a partir de 60 pontos, para ambas as aquisições.

Pode-se concluir que para o par de interferogramas utilizados na simulação, 60 pontos seriam suficientes para se obter os valores de “*offset*” de fase confiáveis. Como utilizou-se o ‘pior caso’ para o par de interferogramas, ou seja, em uma área acidentada, 60 pontos seriam também suficientes para se calcular o “*offset*” de fase em qualquer tipo de área.

Considerando que o tempo de processamento efetivo das funções de “*offset*” de fase, não variam muito quando se passa de 60 para 100 ponto, segundo a ilustração da Figura H.5, e também como uma garantia para possíveis inteferogramas mais ruidosos, escolheu-se o número de pontos igual a 100.

APÊNDICE I

DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE GEOCODIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE IMAGENS SAR INTERFEROMÉTRICAS

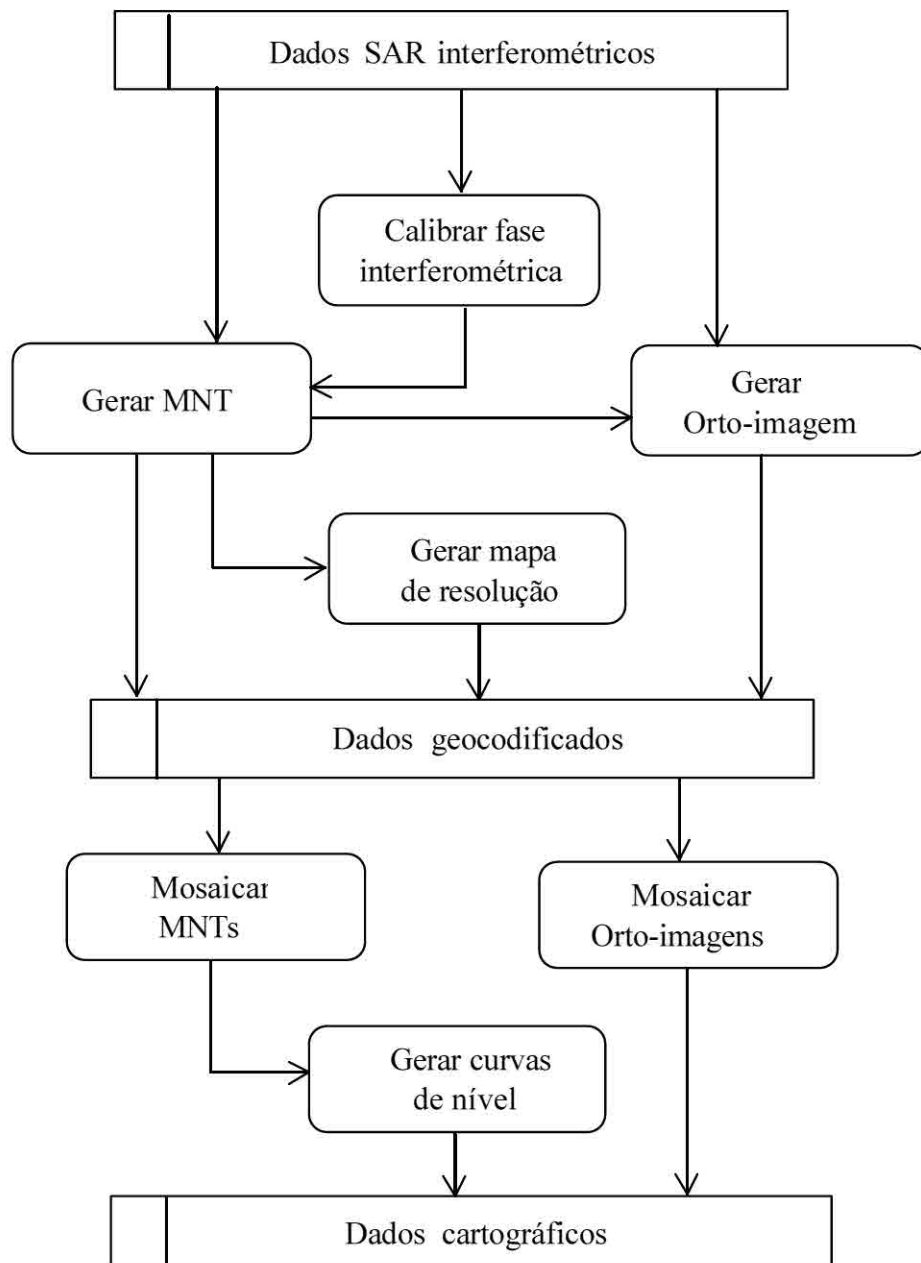
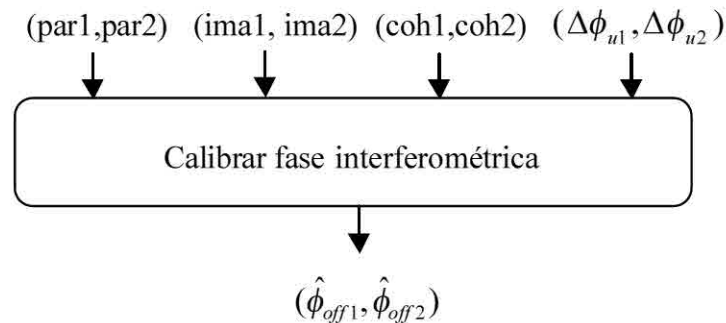


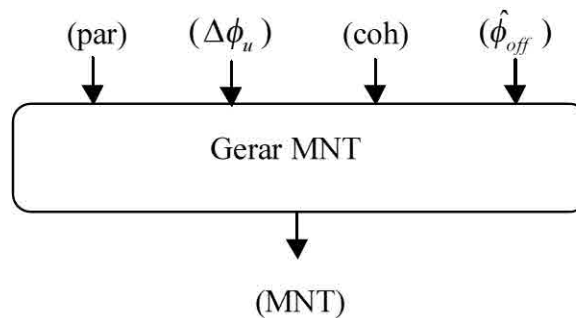
Fig. I.1 - Diagrama geral do sistema Geo-InSAR

I.1 Calibração de fase interferométrica



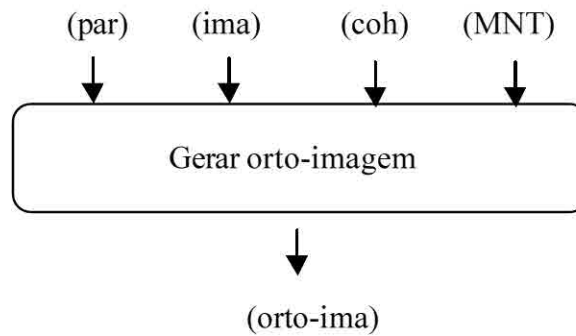
- Entrada: - arquivos de parâmetros das imagens: $(par1, par2)$
- arquivos de imagens de duas aquisições: $(ima1, ima2)$.
- arquivos de imagens de coerência de duas aquisições: $(coh1, coh2)$.
- arquivos de fase desdobrada de duas aquisições: $(\Delta\phi_{u1}, \Delta\phi_{u2})$.
- Saída: - valores de "offset" de fase estimados, referente às duas aquisições: $(\hat{\phi}_{off1}, \hat{\phi}_{off2})$.

I.2 Geração de Modelo Numérico de Terreno



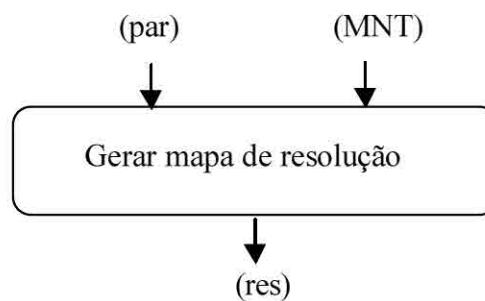
- Entrada: - arquivo de parâmetro: (par)
- arquivo de fase desdobrada: $(\Delta\phi_u)$
- arquivo de imagem de coerência: (coh)
- valor de "offset" de fase: $(\hat{\phi}_{off})$
- Saída: - arquivo de modelo de elevação: (MNT)

I.3 Geração de Orto-Imagem SAR



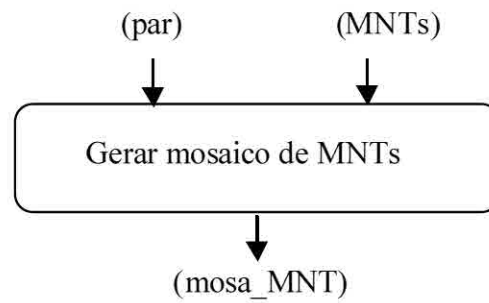
- Entrada: - arquivo de parâmetro: (par)
- arquivo de imagem SAR: (ima)
- arquivo de imagem de coerência: (coh)
- arquivo de modelo de elevação: (MNT)
- Saída: - arquivo de orto-imagem: (orto-ima)

I.4 Geração de Mapa de Resolução



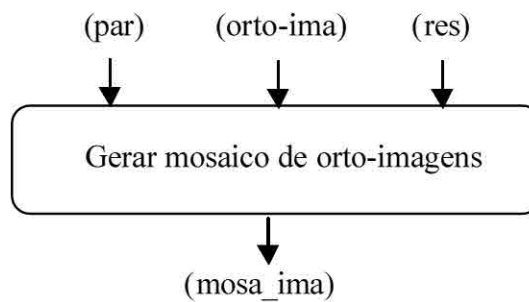
- Entrada: - arquivo de parâmetro: (par)
- arquivo de modelo de elevação: (MNT)
- Saída: - arquivo de mapa de resolução: (res)

I.5 Mosaicagem dos Modelos de Elevação



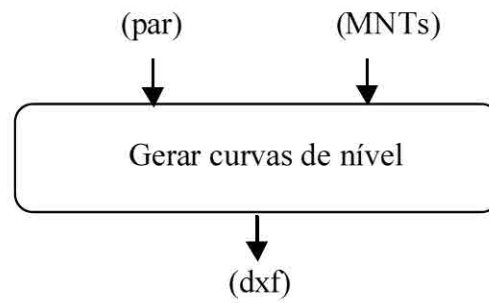
- Entrada: - arquivo de parâmetro: (par)
- arquivos de modelos de elevação: (MNTs)
- Saída: - arquivo de mosaico de MNTs: (mosa_MNT)

I.6 Mosaicagem das Orto-Imagens



- Entrada: - arquivo de parâmetro: (par)
- arquivos de orto-imagens: (orto-ima)
- arquivos de mapa de resolução: (res)
- Saída: - arquivo de mosaico de orto-imagens: (mosa_ima)

I.7 Geração das Curvas de Nível



- Entrada: - arquivo de parâmetro: (par)
- arquivos de modelos de elevação: (MNTs)
- Saída: - arquivo dxf: (dxf)

