



INPE-15382-TDI/1401

# CORREÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO INSAR ATRAVÉS DE SUPERFÍCIES DE AJUSTES GERADAS POR MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL)

Marcos Antônio Timbó Elmiro

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Luciano Vieira Dutra e José Cláudio Mura, aprovada em 26 de agosto de 2008

 $Registro\ do\ documento\ original: $$ < http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.14.14.09> $$$ 

INPE São José dos Campos 2008

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

# CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

## Presidente:

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

#### Membros:

Dra Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

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

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

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

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

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

## **BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

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

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

# REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

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

## EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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





INPE-15382-TDI/1401

# CORREÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO INSAR ATRAVÉS DE SUPERFÍCIES DE AJUSTES GERADAS POR MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL)

Marcos Antônio Timbó Elmiro

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Luciano Vieira Dutra e José Cláudio Mura, aprovada em 26 de agosto de 2008

 $Registro\ do\ documento\ original: $$ < http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.14.14.09> $$$ 

INPE São José dos Campos 2008 E64c Elmiro, Marcos Antônio Timbó.

Correção de modelos digitais de elevação INSAR através de superfícies de ajustes geradas por métodos de interpolação espacial) / Marcos Antônio Timbó Elmiro. – São José dos Campos: INPE, 2008.

207p.; (INPE-15382-TDI/1401)

Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

1. Modelos digitais de elevação. 2. Interferometria SAR. 3. Interpolação de superfícies. 4. Correções de altitudes. 5. Modelos digitais de alturas interferométricas. 6. Biomassa aérea. I. Título.

CDU 528.92)

Copyright © 2008 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecánico, fotográfico, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, eletronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dra.	Leila Maria Garcia Fonseca	6,5		
		Presidente / INPE / SJCampos - SP		
Dr.	Luciano Vieira Dutra	Lucions Buts		
		Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP		
Dr.	José Cláudio Mura			
		Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP		
Dra.	Corina da Costa Freitas	l Den Vas.		
		Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP		
Dr.	João Roberto dos Santos	João Robert de Sanda		
		Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP		
Dr.	João Roberto Moreira Junior			
		Convidado(a) / ORBISAT / Campinas - SP		
Dr.	Nilton Nobuhiro Imai	Mltm d kerai		
		Convidado(a) / UNESP/PP / Presidente Prudente - SP		

"Se as coisas são inatingíveis... ora! Não é motivo para não querê-las... Que tristes os caminhos, se não fora a mágica presença das estrelas".

MÁRIO QUINTANA

A minha esposa, ROSÂNGELA e a meus filhos, GUSTAVO e NATHÁLIA.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço antes de tudo a Deus que até aqui me ajudou, me guiando pelos caminhos certos e retos, desviando minha trajetória dos grandes obstáculos do caminho.

De forma muito especial, aos meus orientadores, Dr. Luciano Vieira Dutra e Dr. José Cláudio Mura pela confiança, incentivo e orientação que me deram durante a realização deste trabalho.

Aos colegas pesquisadores e alunos de Pós-Graduação do INPE: Fábio Furlan Gama, Antonio Henrique Correa, Paulo Cesar Gurgel e Pierre Moura que contribuíram com informações e ajuda nos trabalhos de campo.

À Divisão de Processamento de Imagens da OBT - INPE pela oportunidade de estudos e pelo uso de suas instalações, onde recebi excelente suporte material e de onde pude absorver o conhecimento que brota das salas, dos laboratórios e das cabeças, fluindo pelos cantos e corredores.

Ao Departamento de Cartografia da UFMG pela indicação e suporte financeiro na realização do curso.

Aos professores e colaboradores do curso da CAP do INPE pelo compartilhamento do saber.

Aos colegas de turma e de disciplinas cursadas no INPE pela saudável convivência que me proporcionaram ensinamentos edificantes em todos os sentidos.

Aos membros da Banca de Doutorado pelas sugestões para melhoria do trabalho final.

Às secretárias da CAP que com toda presteza me ajudaram nos trâmites administrativos.

À minha esposa Rosangela e meus filhos Gustavo e Nathália que foram o meu porto seguro nas travessias dos mares tormentosos e nas ameaças de navegação à deriva.

Finalmente agradeço a todas as pessoas que me ajudaram a vencer mais esta etapa da carreira e da vida.

## **RESUMO**

Modelos digitais de elevação têm sido muito utilizados em aplicações de análises espaciais que envolvem estudos em diferentes áreas das ciências da Terra. À medida que esses tipos de modelos ficam mais difundidos, cresce também a preocupação com a qualidade dos dados de elevação e com a propagação dos erros nas análises derivadas a partir desses modelos. Entretanto, os modelos de elevação disponíveis geralmente relatam somente o valor médio dos erros, tal como o erro médio quadrático, os quais não fornecem informação de tendências ou padrões espaciais da distribuição dos erros nem os comportamentos locais. Esta pesquisa trata da análise de modelos de elevação gerados por interferometria de imagens de radar, que é uma técnica que apresenta vantagens estratégicas, quando comparada a outros métodos de construção de modelos de elevação. O objetivo principal da pesquisa é apresentar uma metodologia para correção de modelos de interferometria radar, em banda P e banda X, da Floresta Nacional de Tapajós, capaz de tratar erros globais e erros locais de diferentes magnitudes presentes nos dados de elevação. Estes tipos de erros, que afetam com frequência os modelos de elevação, são geralmente decorrentes de diferentes fatores relacionados à geometria de imageamento, ao processamento dos dados e à topografia do terreno imageado. O método de correção apresentado também fornece indicadores da qualidade global e local dos modelos após a aplicação dos tratamentos. A idéia central da metodologia é prover correção dos modelos de forma a ajustá-los o melhor possível à realidade geográfica do terreno através da incorporação de superfícies de correção calculadas por diferentes métodos de interpolação. As estratégias e algoritmos para as correções foram implementadas com apoio do software Interactive Data Language (IDL). As referências cartográficas usadas na geração das superfícies de correção consistem em uma estrutura de pontos de controle de campo obtidos em estradas, clareiras e pastagens, medidos no terreno por rastreamento de satélites do Sistema de Posicionando Global e por métodos topográficos apoiados por estações eletrônicas de levantamentos. Os métodos de interpolação utilizados no cálculo das superfícies de correção incluíram a triangulação com interpolação linear, a ponderação pelo inverso do quadrado da distância, o ajuste por splines e a técnica de krigagem. Os modelos corrigidos foram testados de diferentes maneiras e utilizados para estimação de parâmetros da floresta a partir da diferença entre o modelo banda X e o modelo banda P. Os principais resultados mostraram que a aplicação dos métodos de correção melhorou a qualidade geométrica dos modelos originais e forneceu estimativas numéricas confiáveis da precisão dos modelos corrigidos.

# CORRECTION OF INSAR DIGITAL ELEVATION MODELS USING FITTING SURFACES GENERATED BY SPATIAL INTERPOLATION METHODS

## **ABSTRACT**

Digital elevation models (DEM) are extensively used in a wide range of spatial analysis applications involving earth sciences. As DEM applications are becoming more widespread, so does concern about the quality of the available elevation data and the propagation of digital elevation model errors through the many analysis extracted from DEM. However, currently available digital elevation models frequently report only the average magnitude of errors as the root mean square error, which does not provide information on systematic bias nor on the spatial patterns of the digital elevation model errors. The present research is related to digital elevation model generated by synthetic aperture radar interferometry in Tapajós National Forest. The main objective is developing a method for digital elevation model correction providing statistical estimation of the method's efficiency. The core of the methodology for digital elevation model error correction and calibration intends to provide a digital elevation model fitting to geographic space reality by calculating and incorporating error compensation surfaces generated by triangulation with linear interpolation, inverse squared distance, splines and kriging interpolation. The digital elevation model calibration methodology also includes determination of global and local accuracy spatial pattern in processed digital elevation model. The compensation surfaces for digital elevation model calibration are calculated from comparison of original digital elevation model data positions with corresponding known cartographic land marks. The calculated correction surfaces are added to DEM in a pixel by pixel basis. The assessment of correction efficiency is given by analyzing statistical quality data extracted from fitted digital elevation model that provided measures of local and global digital elevation model accuracy. The processed DEM were used for estimating forest parameters by differencing P band from X band, producing a digital height model. Results revealed that Tapajós digital elevation models considered in analysis present local and global errors that need to be corrected before their uses in posterior analysis applications. Results also shown that application of proposed correction method, besides improving digital elevation model geometric quality, also provided statistically confident numerical estimation of digital elevation model global and local accuracy.

# **SUMÁRIO**

Pág.

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	27
1.1 – Apresentação e contextualização do problema	
1.2 – Justificativa	30
1.3 – Objetivos	32
1.4 – Contribuição da pesquisa	. 34
1.5 – Organização do trabalho	.35
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS TÓPICOS RELACIONAD	OS
À PESQUISA	.37
2.1 – Revisão dos trabalhos científicos relacionados à pesquisa	.37
2.1.1 – Trabalhos relacionados à área de estudo da FLONA Tapajós	39
2.2 – Modelos digitais de elevação - MDE	.40
2.2.1 – Estruturas de representação de MDE	.43
2.2.2 – Fontes de dados e produtos derivados das análises de MDE	.47
2.2.3 – Qualidade e confiabilidade de um MDE	51
2.3 – Interferometria SAR (InSAR) na geração de modelos tridimensionais	52
2.3.1-Distorções causadas pela geometria de aquisição InSAR que degradam os MDEs .	. 59
2.3.2 – Métodos de aquisição dos dados SAR interferométricos	. 60
2.3.3 – Processamento dos dados interferométricos	.61
2.3.4 – Coerência interferométrica como controlador na geração do MDE	62
$2.3.5-Capacidades\ ampliadas\ do\ m\'etodo\ In SAR\ para\ melhoria\ da\ produç\~ao\ de\ MDE$	. 63
$2.3.5.1-SRTM\ como\ exemplo\ do\ potencial\ InSAR\ para\ produção\ global\ de\ MDE$	. 64
2.3.5.2 – Sistema InSAR aerotransportado para geração de MDE	. 66
2.3.6 – Interação dos fatores e processos de degradação dos MDEs InSAR	. 67
2.3.6.1 – Erros globais.	. 69
2.3.6.2 – Erros locais	.70
2.3.6.3 – Erros pontuais.	. 70
2.4 – Fundamentos básicos para avaliação e correção geométrica de superfícies 3D	.72
2.4.1 – Técnicas matemáticas gerais para correção de erros em superfícies 3D	.73
2.4.2 – Simplificações de modelos matemáticos adotados nesta pesquisa	78

2.4.3 – Métodos de interpolação para criação de superfícies contínuas
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA E AVALIAÇÕES INICIAIS83
3.1 – Estrutura geral do método de pesquisa
3.2 – Caracterização da área de estudo
3.3 – Coleta dos dados da pesquisa
3.3.1 – Dados de controle de campo: levantamentos GPS e topográficos
3.3.2 – Dados de imageamento InSAR
3.4 – Avaliações preliminares e requisitos de tratamentos dos MDEs InSAR95
3.4.1 – Avaliação da consistência interna dos MDEs: tratamento de <i>outliers</i> 96
3.4.1.1 – Critério de Chauvenet no tratamento de <i>outliers</i>
3.4.1.2 – Tratamento de <i>outliers</i> pelo método do <i>Boxplot</i>
3.4.1.3 – Tratamento de <i>outliers</i> com base na proximidade e declividade
3.4.2 – Consistência externa dos MDEs e verificação da necessidade de ajustes 104
3.4.2.1 – Análise de tendências direcionais globais de inclinação dos MDEs 105
3.5 – Métodos de correção dos MDEs da área de estudo
3.5.1 – Método de correção por deslocamento vertical
3.5.2 – Método de correção por triangulação local com <i>buffer</i> de transição
3.5.3 – Estrutura geral e contribuições dos métodos de correção aplicados
3.5.4 – Ajuste de uma superfície plana (offset) para correção dos modelos
3.5.5 – Superfície de correção por triangulação com interpolação linear
3.5.6 – Superfície de correção pelo inverso do quadrado da distância
3.5.7 – Superfície de correção pelo método de <i>splines</i>
3.5.8 – Superfície de correção pelo método de krigagem
3.6 – Estratégias complementares de avaliação dos MDEs
3.6.1 – Avaliação do MDE da banda P com pontos medidos no chão da floresta132
3.6.2 – Avaliação dos MDEs da banda P e da banda X com perfis de laser (LIDAR) 134
3.6.3 – Avaliação dos MDEs com base em critérios cartográficos
3.7 – Extração de informações de alturas da floresta derivadas dos MDEs
$3.8$ – Derivação da biomassa da floresta usando o MDA e $\sigma^0_{HH}$ da banda P
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE RESULTADOS143
4.1 – Testes estatísticos de igualdade de variâncias dos MDE corrigidos
4.2 – Testes estatísticos de igualdade de médias dos MDE corrigidos
4.3 – Análise qualitativa geral dos MDEs corrigidos pelos métodos propostos145
4.3.1 – Resultados globais
4.3.2 – Resultados locais
4.3.3 – Resultados pontuais
4.3.4 – Resultados da análise do Padrão de Exatidão Cartográfica dos MDEs corrigidos 164

4.4 – Resultados de comparação do MDE banda P com pontos medidos sob a floresta	168
4.5 – Resultados de comparação dos MDEs corrigidos com dados LIDAR	170
4.6 – Resultados da extração de alturas da floresta (MDA)	173
4.6.1 – Refinamento do MDA para determinação de alturas florestais	175
$4.7$ – Análise dos resultados da biomassa derivada do MDA e do retorno $\sigma^0_{HH}$ banda P	178
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	181
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	187
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191
APÊNDICE A – TABELAS COMPLEMENTARES	201
ANEXO A – NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL	205

# LISTA DE FIGURAS

<u>Pág.</u>
2.1 - MDE da região do Rio São Francisco: (a) grade com curvas de níveis, (b) imagem de
relevo sombreado (c) vistas perspectivas com sobreposição de texturas para realismo
visual das análises
regular
2.3 - (a) Vista em planta de MDE em estrutura de rede triangular irregular (TIN). (b) MDE
em rede TIN com imagem de relevo sombreado mostrando a densidade variável da
triangulação de acordo com a variação do relevo
SAR
2.5 - Ilustração da geometria da interferometria SAR (InSAR ) para obtenção da altimetria do terreno
2.6 - Diferentes tipos de distorções encontradas nos dados InSAR causadas pela geometria de imageamento
2.7 - (a) Esquema do sistema SRTM, (b) MDE SRTM banda C de Tapajós
3.1 - Fluxograma da estrutura geral da metodologia de desenvolvimento da pesquisa 85
3.2 - Localização da área de estudo. O retângulo em azul no detalhe da imagem
LANDSAT corresponde à área geográfica coberta pelo MDE, em tons de cinza 87
3.3 - Fotos ilustrando a variedade de estruturas florestais existentes na região de estudo.
Áreas limpas e degradadas facilitaram as medidas do controle de campo
3.4 - Coleta de dados de campo: (a) por meio de GPS e (b) com uso da estação eletrônica realizadas na área de trabalho
3.5 - Visão geral do Sistema de imageamento InSAR AeS-1. Na foto (a) pode ser vista a
configuração dual de antenas para passagem única em banda X
3.6 - Produtos banda X gerados pelo Sistema de imageamento InSAR AeS-1. (a) Imagem de amplitude e (b) MDE
3.7 - Produtos banda P gerados pelo Sistema de imageamento InSAR AeS-1. (a) Imagem de amplitude e (b) MDE
3.8 - Imagens TM-LANDSAT: (a) de 2000 e (b) de 2005 ilustrando a dinâmica da
paisagem da área de estudo
3.9 - Diagrama de blocos com os passos gerais do procedimento para tratamento de <i>outliers</i> usando o critério de Chauvenet
3.10 - Diagrama de blocos com os passos gerais do algoritmo para tratamento de <i>outliers</i>
pelo método do <i>boxplot</i>
3.11 - Diagrama de blocos com os passos gerais do algoritmo para o tratamento de <i>outliers</i>
pelo método da proximidade e declividade
3.12 - Distribuição geográfica de <i>outliers</i> identificados e removidos por três processos: (a)
Chauvenet, (b) boxplot e (c) proximidade e declividade
3.13 - Erros em grupos de pontos distribuídos geograficamente nos MDEs, mostrando
sucessões de picos e vales característicos de erros locais de tamanhos variáveis (a)
banda P e (b) banda X
3.14 - (a) MDE e (b) correções calculadas pelo método da triangulação com buffer de
transição112
3.15 - Distribuição geográfica das áreas de treinamento (cor vermelha) e de teste (cor
azul) sobre uma imagem de fusão banda X em amplitude com LANDSAT RGB 116
3.16 - Representação esquemática da correção pelo método do offset118

3.17 - Superfícies de correção relativas ao arranjo tipo 2, obtidas por triangulação com
interpolação linear: (a) banda P destacando pontos das amostras de treinamento em
vermelho e (b) banda X
3.18 - Superfícies de correção pelo IQD relativas ao arranjo tipo 2, (a) banda P destacando
os pontos de amostra, em vermelho, e (b) banda X
3.19 - Superfícies de correção por <i>splines</i> , (a) banda P com destaque para os pontos de
amostra em vermelho, e (b) banda X
3.20 - Superfícies de correção por kigagem, (a) banda P e (b) banda X
3.21 - Localização das áreas medidas sob a floresta para avaliações complementares 133
3.22 - Área de avaliação: (a) MDT do levantamento topográfico do chão da floresta, (b)
MDE da banda P e (c) MDE da banda X
3.23 - Localização dos perfis LIDAR: (a) perfis dentro da área do MDE, (b) Perfis usados
na avaliação dos MDEs corrigidos
3.24 - Imagens em tons de cinza da (a) biomassa e (b) de alturas interferométricas 140
4.1 - MDEs corrigidos: (a) banda P ajustado pelo método do IQD e (b) banda X ajustado
por triangulação com interpolação linear
4.2 - Produtos de relevo sombreado extraídos do MDE banda P corrigido pelo método do
IQD: (a) em tons de cinza, (b) em cores variando do azul (menos elevados) ao
vermelho (mais elevados) e (c) nas cores do Arcoiris
4.3 - MDEs corrigidos com as curvas de níveis derivadas dos próprios modelos: (a) banda
P, (b) detalhe ampliado banda P, (c) banda X e (d) detalhe ampliado banda X
4.4 - Trechos da drenagem no MDE original (a, b, c) com interupções e os
correspondentes no MDE corrigido (d, e, f) com melhorias de fluxo
4.5 - Mapas de precisão local dos MDEs processados por Dutra et al. (2002), (a) banda P
e (b) banda X
4.6 - Mapas de precisão local dos MDEs processados por Moura (2005), (a) banda P e (b)
banda X
4.7 - Mapas de precisão local dos MDEs processados, (a) por IQD e (b) por triangulação
com interpolação linear
4.8 - (a) outlier significativo do ponto de vista geográfico identificado por todos os
processos e (b) resultado do tratamento. (c) outlier pouco severo não identificado por
todos os processos e (d) resultado do tratamento
4.9 - Distribuição geográfica dos <i>outliers</i> identificados no MDE da banda P, usando a
composição de três métodos com janela 5x5 e 3 interações de cada filtro
4.10 -Comparação de perfis MDE e LIDAR. Parte superior: videografia com a trajetória
do LIDAR em vermelho. Abaixo: perfis MDE P, MDE X, LIDAR mínimo e LIDAR
máximo
4.11 - Dispersão das alturas da vegetação InSAR versus LIDAR
<u>.</u>
4.12 - (a) MDA da floresta, tons escuros: solos descobertos; tons médios: regenerações;
tons claros: florestas. (b) Imagem LANDSAT RGB correspondente
4.13 - (a) Localização das áreas desprovidas de cobertura vegetal para refinamento do
MDA, e (b) superfície de correção do MDA
4.14 - (a) Fatiamento do MDA de Dutra et al. (2002). (b) Fatiamento do MDA resultante
dos MDEs corrigidos. (c). Fatiamento do MDA refinado por triangulação
4.15 - (a) Mapa com cinco classes de biomassa obtidos do MDA, e (b) fatiamento do
MDA em cinco faixas de altura
4.16 - (a) Mapa com 4 classes de desvio padrão da estimativa de biomassa, e (b)
representação 3D da imagem de desvio padrão da estimativa de biomassa

## LISTA DE TABELAS

<u>Pág.</u>
<ul> <li>3.1 - Resumo dos totais de áreas e pontos usados nos arranjos de pontos de controle</li></ul>
3.3 - Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método da triangulação para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle
3.4 - Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método do IQD para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle
3.5 - Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método de <i>splines</i> para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle
3.6 - Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método da krigagem para os dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle
3.7 - Classificação de produtos cartográficos segundo o Decreto Lei 89.817
4.1 - Indicadores numéricos da qualidade dos MDEs corrigidos pelo método do deslocamento vertical aplicado por Dutra et al. (2002) para dados de teste relativos
aos cinco arranjos de pontos de controle
4.3 - Indicadores médios da qualidade da correção dos MDEs pelos cinco métodos
4.4 - Resumo de indicadores da qualidade global da correção do MDE da banda P 152
4.5 - Resumo de indicadores da qualidade global da correção do MDE da banda X
4.6 - Resumo de indicadores da qualidade local do MDE de Dutra et al. (2002)
4.8 - Resumo de indicadores da qualidade local do MDE de Moura (2003)
4.9 - Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método do IQD com os cinco arranjos da estrutura de controle
4.10 - Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método da
triangulação linear
4.11 - Indicadores numéricos da qualidade do MDE da banda P comparada com os levantamentos de campo
4.12 - Indicadores numéricos dos MDEs da banda P avaliados com o MDT de campo 169
4.13 - Indicadores d a qualidade local dos MDEs avaliados com perfis LIDAR 170
4.14 - Comparação de valores negativos encontrados nos MDA
A.1 - Resumo de indicadores da qualidade local do MDE de Dutra et al. (2002)
A.2 - Resumo de indicadores da qualidade local do MDE de Moura (2005)
A.3 - Resumo de indicadores da qualidade local do MDE P e X
A.4 - Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método de Dutra etal.
(2002) com os cinco arranjos da estrutura de controle
A.5 - Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método de Moura (2005) com os cinco arranios da estrutura de controle

#### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DEM - Digital Elevation Model
DHM - Digital Height Model

DGPS - Differential Global Positioning System

DSG - Diretoria do Serviço Geográfico do Exército

DSM - Digital Surface Model
DTM - Digital Terrain Model

EMQ - Erro Médio Quadrático, também chamado RMSE (Root Mean

Sqared Error)

ESA - European Space Agency

FLONA - Floresta Nacional

GPS - Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)

HH - Polarização Horizontal Horizontal da onda eletromagnética
 HV - Polarização Horizontal Vertical da onda eletromagnética

ICP - Iteractive Closest Point (Algoritmo Iterativo do Ponto Mais Próximo)

IDL - Interactive Data Language

IFOV - Instantaneous Field of View (Campo de Visada Instantâneo do Sensor)

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INS - Inertial Navigation System

IQD - Interpolador do Inverso do Quadrado da Distância

InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar

JPL - Jet Propulsion Laboratory (Laboratório de Propulsão a Jato)

LIDAR - Light Detection and Ranging

MAE - Mean Absolute Error ou Erro Médio Absoluto

MDA - Modelo Digital de Alturas
 MDE - Modelo Digital de Elevação
 MDS - Modelo Digital de Superfície
 MDT - Modelo Digital de Terreno

MNE - Modelo Numérico de Elevação
 MNT - Modelo Numérico de Terreno
 MNS - Modelo Numérico de Superfície

NASA - National Aeronautics and Space Administration (Administração de

Aeronáutica e Espaço dos EUA)

NIMA - National Imaging and Mapping Agency (Agência de Mapeamento e

Imageamento dos EUA)

NTCN - Normas Técnicas da Cartografia Nacional

PEC - Padrão de Exatidão Cartográfica RADAR - Radio Detection and Ranging RGB - Red Green Blue

RMSE - Root Mean Squared Error, também chamado EMQ (Erro Médio

Quadrático)

SAR - Synthetic Aperture Radar - Radar de abertura Sintética

SCN - Sistema Cartográfico NacionalSGB - Sistema Geodésico Brasileiro

SIG - Sistema de Informações Geográficas ou Georeferenciadas

SLC - Single Look ComplexSNR - Signal to Noise Rate

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

TIN - Triangular Irregular Network

TM - Thematic Mapper

UTM - Universal Transverso de Mercator (Projeção Cartográfica)

VH - Polarização Vertical HorizontalVV - Polarização Vertical Vertical

WGS-84 - World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial de 1984)

# LISTA DE SÍMBOLOS

3D	- Tridimensional (três dimensões X,Y,Z)
C	- Banda C do espectro de microondas
E	- Coordenada Este no Sistema UTM
Н	- Polarização horizontal
$h_{int}$	- Altura Interferométrica
L	- Banda L do espectro de microondas
N	- Coordenada Norte no Sistema UTM
P	- Banda P do espectro de microondas
V	- Polarização vertical
X	- Banda do espectro X de microondas
α	- Rotação em torno do eixo X
$\beta$	- Rotação em torno do eixo Y
γ	- Rotação em torno do eixo Z
λ	- Comprimento de onda
I	- Intensidade do sinal radar
$\varphi$	- Fase do sinal radar
$\sigma^{\circ}$	- Espalhamento de retorno (retroespalhamento) do sinal radar
$\cap$	- Convexidade para baixo
$\cup$	- Convexidade para cima

## **CAPÍTULO 1**

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação e contextualização do problema

Nos dias atuais, existe sólida conscientização de que o desenvolvimento sistemático global, regional e, até mesmo, local não é possível sem informações adequadas, precisas e sinóticas acerca da natureza, da quantidade e da distribuição dos recursos naturais e das riquezas produzidas pela humanidade. A Topografia da superfície terrestre controla o fluxo da energia, a distribuição dos nutrientes, o movimento das massas e a dispersão da água na grande maioria das paisagens. Além disso, tem sido fator importante para exploração de possibilidades alternativas e para o fornecimento de elementos técnicos nas decisões e intervenções no ambiente. Por tais razões, os mapas topográficos convencionais e seus correspondentes modernos em formatos digitais, que trazem informações 3D do terreno, têm sido bastante utilizados para estudar processos da paisagem distribuídos no espaço geográfico.

Desde longa data, os mapas topográficos têm sido a base geográfica e topográfica de uso tradicional para suporte aos inventários, levantamentos de recursos terrestres e análises geográficas de diversas naturezas. Entretanto, a produção de mapas por meio de sistemas e métodos convencionais tem sido morosa, muito dispendiosa e não tem dado resposta satisfatória para a crescente demanda por informações espaciais indispensáveis a diversas análises destinadas ao suporte das atividades de planejamento e gestão de recursos de diferentes naturezas distribuídos no espaço geográfico (BURROUGH E MCDONNELL, 1998).

Neste cenário dinâmico de demandas em expansão, alternativas tecnológicas para mapeamento topográfico e coleta de informações georeferenciadas da superfície do terreno, baseadas em sensores remotos que forneçam respostas ágeis, são consideradas muito importantes. Essas alternativas evoluíram bastante nos últimos tempos e têm sido cada vez mais exploradas e pesquisadas, gerando cada vez mais expectativas no meio científico e técnico. Um dos produtos de sensoriamento remoto de maior utilidade geral e

de alta demanda em diversas áreas científicas são os modelos digitais de elevação (MDE).

MDEs são representações numéricas de dados geográficos do terreno freqüentemente disponíveis no formato de grades regulares e estruturadas de forma adequada para utilização em computadores. Importantes ferramentas de análises espaciais têm sido desenvolvidas com base em dados geográficos sob a forma de modelo digital de elevação, pois permitem extrair facilmente informações derivadas para uso em diferentes áreas das ciências da Terra (REES, 2000; HOLMES et al., 2000). Os princípios básicos para gerenciamento, aquisição, armazenamento, atualização, análise espacial, visualização e a integração de tais modelos com outros sistemas de informações e analises já são razoavelmente bem conhecidos. Os MDEs podem ser criados por diferentes métodos, incluindo o uso de sensores remotos aerotransportados e orbitais, a digitalização de curvas de níveis de mapas existentes e o uso de levantamentos topográficos de campo (OUARZEDDINE, 2002).

Nos MDEs obtidos por métodos de sensoriamento remoto, dependendo do tipo de sensor utilizado, o retorno do sinal pode ocorrer na superfície de cobertura do solo ou em algum ponto intermediário situado entre a superfície de cobertura do solo e o chão propriamente dito. A seleção, extração, separação ou eliminação automática de pontos, objetos ou superfícies não pertencentes ao terreno natural tem sido possível por meio de processamentos numéricos capazes de produzir resultados satisfatórios em várias aplicações.

Apesar de MDEs já serem rotineiramente utilizados em várias aplicações, os novos desenvolvimentos científicos e tecnológicos têm proporcionado muitas oportunidades para a incorporação de aperfeiçoamentos em diferentes etapas do processo de formação e de análise desses modelos, principalmente, em relação a novas técnicas de aquisição de dados como a interferometria de imagens de radar.

A construção de MDEs pelo método de interferometria de imagens de radar de abertura sintética (InSAR) apresenta importantes vantagens, quando comparada com outras tecnologias de construção de MDEs, principalmente, quando se trata de mapeamento altimétrico de regiões densamente florestadas, como é o caso da Amazônia, onde a

utilização dos métodos convencionais de fotogrametria tem sido, ao longo dos anos, uma tarefa muito difícil devido à predominância da cobertura vegetal e à presença constante de densas coberturas de nuvens. A tecnologia de interferometria de imagens de radar apresenta um potencial inovador e diferenciado para solucionar estes difíceis problemas de enormes dimensões. A radiação do espectro das microondas em banda P, além de atravessar as nuvens, atravessa também a massa de vegetação, podendo atingir potencialmente o solo da floresta (DUTRA et al., 2002; TIMBÓ ELMIRO et al., 2003, 2006). Entretanto, a interferometria SAR em banda P é uma tecnologia relativamente recente, em constante evolução, e apresenta diversos problemas que ainda não foram completamente resolvidos.

Nesse contexto de expansão das novas fontes de dados para MDEs, um ponto muito importante, quando se utilizam dados geográficos provenientes de diferentes fontes para fins de mapeamento, inventário e análise espacial dos recursos da Terra, é a questão da correção dos erros e fidelidade geométrica visando atingir padrões especificados e aceitos, por consenso geral, para diferentes escalas de mapeamento cartográfico. Esses aspectos são fundamentais para garantir, ao analista de processos geográficos e de dados espaciais, um mínimo de controle quantitativo sobre a qualidade das análises que serão extraídas a partir do suporte destes tipos de dados tridimensionais (HEUVELINK, 1998). A legislação cartográfica nacional, por exemplo, estabelece através do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) que 90% dos pontos bem definidos em um documento cartográfico não podem ter erro planimétrico superior a 0.5 mm na escala do mapeamento (BRASIL, 1984 - Decreto Lei 89817 de 1984, Capítulo II, seções I e II). Esse mesmo PEC estabelece que o erro altimétrico deve ser menor que a metade da equidistância adotada para as curvas de níveis. Outros critérios similares, com pequenas diferenças, são adotados por cientistas e instituições que lidam com mapeamento de recursos geográficos pelo mundo afora, indicando que a qualidade geométrica dos dados espaciais tem sido uma preocupação bastante relevante (TIMBÓ ELMIRO, 1994).

Os dados tridimensionais que contribuem na formação de modelos digitais de terrenos, provenientes de imageamento por sensoriamento remoto, podem ser submetidos a duas formas gerais de correção com objetivo de ajustá-los o mais próximo possível à realidade geográfica do terreno. A primeira forma baseia-se no conhecimento preciso e na

modelagem adequada da natureza e da magnitude das fontes de erros que participam de todo o processo de aquisição e de formação do modelo digital de elevação. Esta técnica é adequada, quando toda a geometria do imageamento é muito bem caracterizada. No entanto, apresenta a dificuldade de depender de dados e parâmetros precisos da plataforma, do sensor e do meio ambiente, os quais muitas vezes não estão disponíveis. A outra forma geral de correção de dados de sensoriamento remoto é baseada na determinação de relações matemáticas de mapeamento entre coordenadas de feições imageadas (pixels ou voxels) e as correspondentes coordenadas cartesianas destes mesmos objetos no terreno, referenciados a um sistema cartográfico bem definido. Tais relações de mapeamento de feições são capazes de corrigir a geometria dos dados imageados, trazendo-os para sua correspondência com a realidade geográfica, independentemente do conhecimento da natureza das distorções e de quaisquer outras informações da plataforma de aquisição. Devido a essa independência, tal abordagem tem se mostrado muito flexível e, com base em algumas de suas variações, diversos esforços têm sido empreendidos para resolver problemas gerais de correção geométrica e registro de pontos e superfícies tridimensionais (AUDETTE et al., 2000; GRUEN e AKCA, 2005).

## 1.2 Justificativa

Vários trabalhos já foram realizados abordando essa questão dos tratamentos, ajustes geométricos e melhorias gerais de MDEs provenientes de dados de Sensoriamento Remoto, bem como, de MDEs originados de outras fontes. Alguns estudos iniciais visando melhorias geométricas de MDEs provenientes de fotogrametria foram realizados por Gruen (1985). Ebner e Mueller (1986) e Ebner e Strunz (1988) desenvolveram outros estudos utilizando técnicas de combinação de modelos digitais de elevação. Rosenholm e Torlegard (1988) relataram métodos de correção de MDEs utilizando transformações tridimensionais de similaridade com base no método dos mínimos quadrados. Weik, 1997; Johnson e Kang, 1999; Maas, 2001; Vanden Wyngaerd e Van Gool, 2003 usaram geometria de superfície combinadas com outras informações a fim resolver problemas de ajuste geométrico e combinação de MDEs. Diversas outras aplicações envolvendo

correções de MDE foram relatadas na literatura (KARRAS e PETSA, 1993; MAAS, 2000; MITCHELL e CHADWICK, 1999; PILGRIM, 1996; XU e LI, 2000).

Apesar das iniciativas e realizações implementadas, ainda existem várias lacunas a completar com possibilidades de contribuições relevantes, principalmente, no desenvolvimento de métodos de correção capazes de fazer ajustes adaptativos e flexíveis que possam melhorar a solução de problemas localmente identificados e, ao mesmo tempo, permitir o melhor resultado global. As possibilidades de contribuição também são importantes no aperfeiçoamento de mecanismos para controle e garantia da qualidade interna dos produtos corrigidos (POTTMANN et al., 2004).

Outro aspecto de relevância que orientou o desenvolvimento da presente pesquisa é a necessidade do aprofundamento de estudos para definição de padrões apropriados à avaliação de MDEs derivados de InSAR nos ambientes tipicamente nacionais, tendo em vista que os resultados de testes realizados em outros países, com características climáticas, topográficas e ambientais diferentes, podem não ser aplicáveis de forma plena. O desenvolvimento de soluções satisfatórias que se aplicam a diversos tipos de cenários e particularidades, para melhoria da qualidade de MDE, deve ser buscado com persistência, pois é um ponto de contribuição importante para áreas aplicações que lidam com mapeamento e inventário de recursos geográficos.

Perseguindo as linhas mestras desse enfoque, a motivação do presente trabalho está fundamentada na identificação de problemas encontrados na retificação, registro e georeferenciamento de modelos tridimensionais produzidos pela técnica de interferometria de imagens de radar de abertura sintética (InSAR), em banda P e banda X, obtidos por via aerotransportada na região da Floresta Nacional de Tapajós (FLONA Tapajós), na Amazônia. Os métodos de correções geométricas comumente disponíveis nos *softwares* e sistemas comerciais, muitas vezes, não são suficientemente robustos para modelar distorções mais complexas, caracterizadas por erros não sistemáticos que têm variação espacial muito rápida como os que foram encontrados nos MDEs da região de estudo.

Alguns estudos anteriores realizados com dados InSAR, na mesma área de trabalho, também indicaram a necessidade de aplicar correção e tratamentos geométricos

adequados aos dados de radar (DUTRA et al., 2002; SANTOS et al., 2003; TIMBÓ ELMIRO et al., 2003; MOURA, 2005; NEEFF et al., 2005). Quando os modelos InSAR em banda X e em banda P são submetidos a correções adequadas e eficazes, a diferença entre eles (MDE banda X – MDE banda P) produz um modelo digital da altura da floresta (MDA) mais próximo da realidade local. O MDA é um produto derivado de MDEs InSAR que tem alto potencial de aplicações em estudos florestais e nas pesquisas de recursos naturais e ambientais.

Como poderá ser visto no decorrer deste trabalho, os resultados finais revelaram que os dados altimétricos originais produzidos pela técnica InSAR em banda P e banda X da Floresta Nacional de Tapajós necessitam de avaliações e correções antes de serem utilizados em outras aplicações que geram produtos e análises derivadas de modelo digital de elevação. Poderá ser visto, também, que a aplicação dos métodos de tratamento propostos, além de terem melhorado a qualidade geométrica dos modelos digitais de elevação, forneceram estimativas numéricas confiáveis e parâmetros estatísticos de exatidão, globais e locais, que podem ser usados pelos analistas de processos geográficos para fazer estimativas numéricas da propagação de erros nos produtos derivados de análises de MDE.

A disponibilidade cada vez maior de dados espaciais provenientes de sistemas InSAR, que estão sendo incorporados a novas aplicações de mapeamento, requer, paralelamente, esforços adicionais para desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas robustas de avaliação, correção geométrica e registro preciso desses dados, de forma a garantir a confiabilidade dos produtos e análises derivados dos dados provenientes do imageamento.

## 1.3 Objetivos

O objetivo geral desta tese é o desenvolvimento de uma metodologia para a correção da altimetria de modelos digitais de elevação produzidos pela técnica InSAR em uma área de estudo localizada na Floresta Nacional de Tapajós. No intuito de alcançar esse objetivo geral, os objetivos específicos propostos são:

- 1) fazer uma avaliação preliminar da qualidade altimétrica dos MDEs da Floresta Nacional de Tapajós produzidos pelo método InSAR, em banda P e banda X, averiguando a qualidade interna, em termos da presença de ruídos e valores espúrios (outliers), e a qualidade externa, em termos da existência e da distribuição espacial de erros de naturezas geométricas decorrentes das diferentes etapas do processo de construção do MDE;
- 2) desenvolver métodos para correção interna da altimetria dos MDEs com a finalidade de identificação e tratamento de ruídos e valores espúrios (*outliers*).
- 3) desenvolver métodos para correção externa da altimetria dos MDEs usando modelos matemáticos que incorporam diferentes níveis de rigidez para adaptação à magnitude dos erros geométricos identificados. Os modelos matemáticos são aplicados para criação de superfícies de correção por meio de diferentes métodos de interpolação;
- 4) fazer uma avaliação comparativa da eficiência e adequação dos diferentes modelos matemáticos de correção aplicados nos MDEs, elegendo os mais adequados de acordo com o ganho de qualidade em relação aos modelos originais. A avaliação é baseada na análise de parâmetros estatísticos indicadores da qualidade;
- 5) fazer avaliações da capacidade do MDE da banda P representar um MDT, ou seja, ser representativo da realidade geográfica do terreno isenta da cobertura vegetal e avaliações da capacidade do MDE da banda X representar um MDS, ou seja, ser representativo da realidade geográfica da superfície do terreno incluindo as coberturas do solo existentes. A avaliação é baseada na comparação com dados da verdade terrestre medidos em campo no chão da floresta, levantamentos por varredura a laser (LIDAR) e medidas de alturas de povoamentos florestais derivadas de inventários disponíveis da região de estudo.
- 6) utilizar os MDEs da banda P e da banda X, corrigidos pelos métodos propostos, avaliando seu potencial e qualidade na geração de produtos derivados de análises

de MDE, especialmente o modelo digital de alturas da floresta (MDA) e a estimativa da biomassa aérea.

## 1.4 Contribuição da pesquisa

No caso de extensas áreas com densa cobertura florestal, os únicos métodos, técnica e economicamente viáveis, para realizar o levantamento de dados altimétricos, são aqueles capazes de prover ampla cobertura, registrar dados do chão e das copas da tipologia florestal e que, ao mesmo tempo, exigem poucos pontos de controle de terreno. Essas condicionantes impõem basicamente a aplicação do método InSAR e da técnica de varredura a laser (LIDAR). No caso da Amazônia, onde há também uma densa cobertura de nuvens durante a maior parte do ano, a alternativa mais viável é o método InSAR. Portanto, trabalhos de pesquisa que contribuam para avaliar a eficácia do método InSAR no ambiente de floresta tropical, que explorem e exponham os problemas com clareza, que apresentem soluções diferenciadas adequadas ao problema em questão, e que ajudem na consolidação do uso e do aprimoramento do método, são de relevante contribuição científica e constituem, por si só, importantes aspectos inovadores. Assim, o trabalho de pesquisa enfoca os seis pontos de contribuição a seguir.

A primeira contribuição consiste no desenvolvimento de metodologias de correção de MDE utilizando modelos de ajuste e interpolação de superfícies por deslocamento vertical (offset), por elementos finitos sobre a triangulação de Delaunay, pelo inverso do quadrado da distância, por splines e por krigagem, procurando maximizar a adequação dos modelos digitais de terreno para a realidade geográfica da paisagem.

A segunda contribuição do trabalho é representada pela sistematização de mecanismos e procedimentos de controle e análise da qualidade dos dados e dos resultados. Estes indicadores fornecem dados sobre a exatidão numérica dos MDEs permitindo estimar a qualidade de outros produtos derivados de análises desses MDEs em aplicações posteriores.

A terceira contribuição foi o desenvolvimento de filtros para identificação e tratamento de ruídos e valores espúrios presentes nos modelos digitais de elevação, conhecidos como *outliers*.

A quarta contribuição trata da verificação, na prática e no ambiente da floresta amazônica, de como se comporta o MDE da banda P nas regiões com coberturas vegetais em relação à penetração da radiação nos diferentes estratos da cobertura florestal até atingir o solo.

A quinta contribuição é a utilização do Modelo Digital de Altura (MDA), corrigido pela metodologia desenvolvida neste trabalho, para a estimativa da biomassa da floresta acima do nível do solo, utilizando a regressão estimada por Neeff et al. (2005), que relaciona a biomassa à altura interferométrica com a inserção simultânea do retroespalhamento da banda P\_HH (σ°<sub>HH</sub>) na modelagem, na área de estudo utilizada neste trabalho. No final, apresenta-se também uma avaliação subjetiva do resultado deste modelo de biomassa regional.

Por fim, uma outra contribuição é a sistematização de todo esse conhecimento, o qual foi pesquisado e compilado seletivamente de um amplo conjunto de diferentes áreas científicas. O conhecimento foi sintetizado, integrado e organizado de forma objetiva para aplicações de mapeamento topográfico, de forma a possibilitar a generalização de seu uso em outras áreas geográficas.

#### 1.5 Organização do trabalho

No intuito de atingir os objetivos deste trabalho de pesquisa de tese de forma clara e compreensiva, os assuntos foram estruturados em seis capítulos.

No Capítulo 1 abordou-se o problema, a justificativa, os objetivos e a contribuição do trabalho.

No Capítulo 2 enfoca-se a base teórica, a fundamentação e os conceitos gerais relacionados ao problema em estudo, notadamente, os tópicos de modelos digitais de

elevação, interferometria SAR, erros, valores espúrios e *outliers*, modelos de correções geométricas, registro de superfícies e métodos de interpolação.

No Capítulo 3 é apresentada de forma detalhada, porém objetiva, a metodologia utilizada para atingir os objetivos desta pesquisa de tese, onde todos os tópicos, procedimentos, materiais e meios necessários para implementação e viabilização da pesquisa são abordados.

No Capítulo 4 são apresentados, com os detalhes, os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de pesquisa sobre os dados da área de estudo. Os resultados são acompanhados de discussões e considerações pertinentes. As análises desses resultados formam a base para inferências das conclusões do trabalho.

No Capítulo 5 são colocadas em destaque as principais conclusões extraídas a partir da execução da metodologia e da discussão dos resultados da pesquisa.

No Capítulo 6 são feitas considerações finais sobre aspectos significativos relacionados ao desenvolvimento da pesquisa, suas conseqüências e desdobramentos.

## **CAPÍTULO 2**

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS TÓPICOS RELACIONADOS À PESQUISA

Neste Capítulo é feita uma breve descrição da fundamentação teórica e dos conceitos gerais que deram suporte ao desenvolvimento da pesquisa de tese. Os tópicos abordados estão relacionados, principalmente, a modelos digitais de elevação, interferometria SAR, registro e ajuste de superfícies, erros geométricos, *outliers*, modelos de correções geométricas e métodos de interpolação de superfícies. Devido à larga abrangência do assunto, o enfoque maior foi dado aos tópicos relacionados às correções e ajustes geométricos que contribuíram de forma direta nas análises e implementações de procedimentos efetivamente usados no desenvolvimento dos métodos de correção. A introdução destes conceitos é importante para permitir uma compreensão lógica do problema em estudo.

# 2.1. Revisão de trabalhos científicos relacionados à área pesquisa

Há mais de duas décadas o problema de correção e de controle da qualidade de MDE tem sido motivo de preocupação de cientistas e analistas que lidam com dados geográficos e informações espaciais. Gruen (1985) foi um dos primeiros a abordar o problema da combinação de superfícies 3D, utilizando MDE provenientes de fotogrametria como uma extensão direta do registro de superfícies, aplicando o método dos mínimos quadrados. Vários estudos também foram realizados para orientação absoluta de modelos fotogramétricos tridimensionais usando MDE como informação de controle, caracterizando a combinação de MDE como uma área de pesquisas, proposta por Ebner e Mueller (1986) e Ebner e Strunz (1988). Posteriormente a combinação de MDE foi matematicamente formulada e aperfeiçoada por Rosenholm e Torlegard (1988). O método foi baseado na estimativa dos parâmetros da transformação tridimensional de similaridade entre dois pedaços de MDE, minimizando a soma dos quadrados das diferenças ao longo do eixo Z. Várias outras aplicações de combinação de MDE foram relatadas na literatura (KARRAS e PETSA, 1993; MITCHELL e CHADWICK, 1999;

PILGRIM, 1996; XU e LI, 2000). Maas (2000) desenvolveu aplicações bem sucedidas usando um método similar para registrar dados tridimensionais de faixas de vôo provenientes de varredura de laser, onde as discrepâncias verticais e horizontais são geralmente significativas devido aos problemas da exatidão do GPS/INS, que é a base de georeferenciamento da nuvem de pontos. Um outro método similar foi apresentado para registrar superfícies 3D adquiridas por diferentes métodos, incluindo dados de altimetria a laser e de fotogrametria (POSTOLOV et al., 1999). Além disso, técnicas de combinação de superfície para MDE 2.5D foram desenvolvidas, as quais correspondem matematicamente à combinação de imagens pelo método dos mínimos quadrados. O conceito de combinação de MDE só pode ser aplicado às superfícies 2.5D, cuja função analítica é descrita na forma explícita como uma função de valor único, isto é z=f(x,y). As superfícies 2.5D são de valor limitado em caso de objetos de formatos generalizados. Quando a curvatura de superfície é homogênea ou isotrópica, como ocorre em todas as superfícies de segunda ordem, por exemplo, plano ou esfera, as técnicas de registro baseadas em geometria provavelmente irão falhar. Em alguns estudos a geometria da superfície e a informação da intensidade foram combinadas a fim resolver este problema (JOHNSON e KANG, 1999; MAAS, 2001; VANDEN WYNGAERD e VAN GOOL, 2003; WEIK, 1997).

Passini et al. (2002) descreve um método para correção de MDE, no qual foi desenvolvido um software que faz o ajuste das coordenadas do MDE para as coordenadas dos pontos de controle usando interpolação por mínimos quadrados. Segundo Passini et al. (2002) trata-se de um método muito útil quando as coordenadas dos pontos de controle não são bastante precisas, mas devem ser mantidas fixas que é a situação típica das aplicações de cadastro. A interpolação por mínimos quadrados abordada no trabalho é baseada em uma função de covariância. Em uma área com muitos pontos de controle, cada ponto tem um valor de suporte que é constituído de uma parte sistemática local e de uma parte aleatória. Dentro de pequenas áreas, a parte sistemática tem o mesmo valor e a mesma direção, mas pode mudar para distâncias grandes entre os pontos de controle. Uma covariância experimental pode ser calculada em função da distância dos pontos de controle e uma análise de covariância é feita antes e depois da aplicação da interpolação pelos mínimos quadrados para comprovação da eficiência do

método. Gruen e Akca (2005) fazem uma extensa revisão sobre trabalhos de pesquisa relacionados a estas linhas de estudos. De qualquer forma, ainda são necessárias outras contribuições para reforço do acervo desta área de pesquisa.

#### 2.1.1. Trabalhos relacionados à área de estudo da FLONA Tapajós

Dutra et al. (2002) realizaram ajustes dos modelos InSAR banda P e banda X da FLONA Tapajós com a finalidade de melhorar a qualidade dos dados de elevação para uso em outras etapas de análises. O ajuste realizado nos MDEs foi do tipo offset em altura (deslocamento vertical) para toda a extensão de ambos os modelos, banda P e banda X. A correção foi feita com base na diferença de altitude encontrada entre os modelos InSAR e pontos de controle de campo medidos com receptores do sistema GPS ao longo de estradas e vias de acesso da região. O valor de correção encontrado foi de -13.11 metros. O offset em altura calculado com base na média das diferenças de altitudes melhorou a qualidade altimétrica dos modelos P e X. Entretanto, os pontos de controle de campo utilizados no cálculo do offset foram medidos pelo método GPS diferencial no modo cinemático. Este método GPS possui precisão inferior a dos métodos estáticos e os pontos podem ter sofrido a interferência da vegetação e dos taludes na lateral da estrada, causando perda de ciclos e degradando a diluição da precisão. Os modelos corrigidos por Dutra et al. (2002) foram a base para aplicação dos diferentes métodos de correção deste trabalho de pesquisa de tese, sendo que um novo offset foi aplicado com a utilização de outros pontos de controle mais qualificados.

Outro trabalho de interesse relacionado à área de estudo na Floresta Nacional de Tapajós foi realizado por Moura (2005) que utilizou os modelos InSAR ajustados por Dutra et al. (2002) para pesquisas de avaliação e correção. O principal objetivo deste estudo foi melhorar a qualidade geométrica dos modelos a partir de dados de controle de campo. O método adotado se resume na correção dos modelos de elevação InSAR através do uso de pequenos modelos locais de correção criados a partir de levantamentos de campo realizados com grande precisão por métodos topográficos e rastreamento de satélites do sistema GPS. Os modelos locais de controle permitiram gerar modelos InSAR com maior grau de correção.

A metodologia adotada no estudo de Moura (2005) consiste, em linhas gerais, nos seguintes passos: 1) coleta de amostras de pontos de controle de campo com coordenadas geodésicas precisas obtidas por métodos topográficos em áreas sem cobertura vegetal; 2) criação de pequenos modelos de correção locais precisos, com base nas amostras topográficas, através do método de triangulação usando o algoritmo de Delaunay; 3) refinamento dos modelos triangulares para modelos de grade regular com células de mesma resolução dos modelos InSAR originais; 4) correção de todos os pixels dos modelos InSAR que correspondem às posições dos pixels dos modelos topográficos locais através de um fator calculado com base na diferença entre eles; 5) com a finalidade de evitar descontinuidades na fronteira entre a parte do MDE corrigida e o restante do MDE mantido original, garantindo uma transição suave entre os dois, foi criada uma área de transição de correções no MDE original em volta da parte corrigida do MDE. Nesta área os pixels do MDE InSAR receberam correções correspondentes à correção da borda ponderadas por um fator inverso do afastamento da borda até atingir zero no extremo da área de transição. Detalhes completos desse processo de correção são encontrados em Moura (2005).

Esse método de correção melhorou os modelos, localmente, nas regiões situadas no fecho convexo dos pontos de amostras e, também, nas suas imediações devido ao procedimento de transição adotado, porém, não teve influência nos modelos InSAR fora das áreas das amostras e das zonas de transições. Para produzir efetivamente bons resultados utilizando esse procedimento é necessário aumentar significativamente o número de amostras de campo provenientes de levantamentos topográficos. Seguir essa recomendação pode ser equivalente a gerar um novo modelo inteiramente coberto por amostras de campo, o que seria inviável devido às dificuldades de medidas de campo na floresta. Uma variação deste método está sendo aplicada no trabalho de pesquisa de tese com algumas modificações e utilizando pontos de controle com melhor qualidade.

#### 2.2 Modelos digitais de elevação - MDE

O conhecimento do relevo topográfico, sua integração com os elementos da paisagem e com os demais componentes da cobertura da superfície do terreno tem sido um assunto de grande interesse para estudos e análises em aplicações de diferentes áreas de pesquisas

relacionadas às ciências da Terra. Principalmente, para tratamento de questões relacionadas à organização, planejamento e gestão de recursos distribuídos no espaço geográfico.

Tradicionalmente o relevo da superfície terrestre tem sido representado através de curvas de níveis, pontos cotados, cores hipsométricas, relevo sombreado e perfis topográficos em cartas, mapas e plantas topográficas (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Estas formas convencionais de representação, apesar do seu reconhecido valor e da sua utilização tradicional durante muitos anos, não permitem fazer análises numéricas eficientes, que possam fornecer respostas rápidas, precisas e adequadas para diversos problemas de análise espacial.

O avanço tecnológico e o crescimento das demandas por análises espaciais em diferentes áreas contribuíram para o desenvolvimento, consolidação e uso intensivo dos modelos digitais de elevação (MDE). Os MDEs são estruturas de dados que oferecem a possibilidade de lidar de forma eficiente com as questões de representação e análise de variáveis caracterizadas por uma distribuição contínua no espaço geográfico.

Um MDE consiste na representação matemática da distribuição contínua do relevo da superfície terrestre (ou de outra variável de distribuição contínua) dentro de um determinado espaço geográfico de referência, armazenada em formato digital adequado, próprio para utilização em computadores (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Esta forma de representação de dados espaciais tem se tornado padrão para o tratamento da informação 3D relacionada ao espaço geográfico permitindo modelagem, análise e exibição de processos e fenômenos vinculados aos aspectos físicos do terreno. Os MDEs têm sido considerados como uma das formas mais duradouras e reutilizadas de dados geográficos ao longo do tempo (CÂMARA et al., 2001; MAUNE, 2007).

O emprego das técnicas usadas para fazer análises em MDE não está restrito somente à representação da superfície física do terreno. Qualquer fenômeno ou processo espacial que siga uma distribuição contínua no espaço geográfico pode ser modelado usando as mesmas técnicas e algoritmos, com os ajustes adequados. De fato, este tipo de representação e análise de dados por meio de MDE tem sido muito disseminado e tornou-

se a forma mais utilizada para representação de quaisquer superfícies contínuas nos ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (ZHOU et al., 2008).

Na Figura 2.1 são apresentados diferentes aspectos de apresentação de um MDE, utilizando um exemplo de uma área da região do Rio São Francisco, produzido a partir de imageamento por radar em projetos desenvolvidos no INPE. Na Figura 2.1-a é ilustrada a grade regular com a sobreposição das curvas de níveis produzidas a partir do próprio modelo de elevação. Na Figura 2.1-b é mostrada a imagem do relevo sombreada extraída do modelo e na Figura 2.1-c são ilustradas duas vistas perspectivas do modelo em diferentes ângulos com o recurso de superposição de texturas no modelo de elevação. A sobreposição de texturas, fatiamentos e sombreamentos são alguns dos vários recursos que podem acrescentar bastante realismo ao MDE, realçando resultados de análises, informações e produtos extraídos dos modelos digitais de elevação.

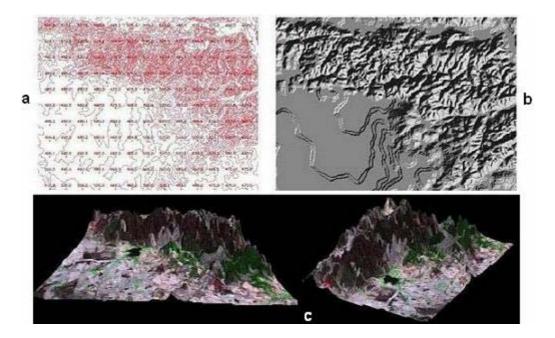


Figura 2.1 – MDE da região do Rio São Francisco. (a) grade com curvas de níveis, (b) imagem de relevo sombreado (c) vistas perspectivas com sobreposição de texturas para realismo visual das análises.

Com o avanço da tecnologia de computadores, o aumento da demanda por informações derivadas de análises espaciais e a crescente disponibilidade de dados tridimensionais da Terra, as aplicações de MDE vêm aumentando continuamente e muitos dos usos já estão

bem consolidados em diversas áreas científicas e técnicas. As seguintes áreas de aplicações bem estabelecidas podem ser identificadas (BURROUGH e MCDONNELL, 1998; LI et al., 2007):

1) Armazenamento da altimetria para mapas digitais em Sistemas de Informações Geográficas; 2) Solução de problemas de corte/aterro e cálculo de volumes nos projetos de rodovias, ferrovias e grandes obras da Engenharia Civil de uma forma geral; 3) Geração automática de curvas de níveis e isolinhas; 4) Geração de perspectivas tridimensionais, blocos-diagrama e perfis topográficos; 5) Planejamento de vias de comunicações, transporte de energia e localização de represas; 6) Planejamento de reservatórios, estudo de redes de drenagem, delineamento de bacias hidrográficas, estimativas de erosão e escoamento; 7) Ortorretificação de fotografias aéreas e imagens de sensoriamento remoto; 8) Preparação de mapas de declividade, mapas de orientação de encostas e de insolação, mapas de relevo sombreado, mapas de convexidade e de concavidade; e 9) Representação tridimensional de paisagens para orientação de mísseis militares, vôos de aeronaves, treinamento de pilotos, análise de intervisibilidade e comunicação.

#### 2.2.1 Estruturas de Representação de MDE

A superfície para representacao da variação contínua da elevação do terreno em uma área geográfica pode ser modelada para uso nos computadores por meio de diferentes estruturas de dados. Os dois arranjos mais conhecidos e comumente utilizados para as aplicações de análises e modelagens nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são as estruturas de grades regulares, também chamadas de matrizes de elevação, e as redes triangulares irregulares, conhecidas pela sigla TIN (Triangular Irregular Network). Qualquer uma dessas formas de representação pode ser convertida na outra e vice-versa, através de algoritmos já consolidados, e a escolha entre usar uma ou outra estrutura depende do tipo da aplicação. Descrições detalhadas sobre estruturas de representação e outros conceitos relacionados a MDE podem ser encontradas em Câmara et al. (2001) e Li et al. (2007).

As matrizes de elevação (grades regulares), devido a sua estrutura simples, podem ser manipuladas com bastante facilidade nos computadores. Por isso, são as formas mais comuns para representação de superfícies contínuas de forma discretizada. Tornaram-se os formatos mais disponíveis e disseminados de MDE em todo o mundo (BURROUGH e MCDONNELL, 1998; Maune, 2007). Grades regulares podem ser produzidas por interpolação a partir de pontos altimétricos irregularmente espaçados obtidos por diferentes processos de amostragem. A Figura 2.2 ilustra duas vistas em perspectivas de trechos diferentes de um MDE representado em estrutura de grade regular. A simples representação em perspectiva do contorno das células da grade fornece uma idéia precisa da variação do relevo.

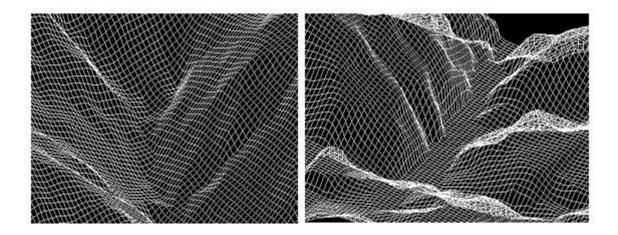


Figura 2.2 – Vistas perspectivas de um MDE em estrutura de armazenamento no formato de grade regular.

Nas grades regulares cada elemento da representação matricial está associado a um valor numérico que representa a altitude do terreno ou outro atributo geográfico de característica contínua. Para a geração e análise da superfície contínua são utilizados algoritmos de interpolação que usam os valores amostrados para estimar os demais não visitados. Os algoritmos de interpolação utilizados para produzir grades regulares se diferenciam de acordo com a variável espacial que está sendo modelada. No caso da altimetria, por exemplo, interpoladores que usam ponderações pelo inverso do quadrado da distância são bastante aceitos. Para variáveis geofísicas a utilização de métodos de krigagem pode ser mais apropriada.

As principais características dos modelos de grade regular são: 1) manipulação simples e eficiente em computadores com disponibilidade cada vez maior no mundo inteiro devido à simplicidade de manuseio; 2) o registro da topologia é feito implicitamente devido à simplicidade de armazenamento e processamento em computador; 3) os pontos amostrais podem ser obtidos diretamente por meio de restituidores analíticos ou a partir da interpolação de malhas irregulares de pontos medidos por diferentes sensores ou métodos de campo convencionais; 4) vários países já têm os seus territórios completamente cobertos por células de diferentes tamanhos derivadas de mapas topográficos, de fotografias aéreas em diferentes escalas e de outros sensores ativos e passivos; 5) a densidade de pontos não se ajusta à complexidade do relevo, exigindo a necessidade de mudança do tamanho da célula em relevos complexos, demandando maiores recursos de memória para armazenamento; 6) implica em redundância de dados nos terrenos com variação uniforme do relevo causando ineficiência computacional; 7) necessidade de muitos pontos amostrais para atingir a uma precisão satisfatória das variáveis modeladas.

As redes Triangular Irregular Network (TIN) foram desenvolvidas para superar os problemas de redundância apresentados pelas matrizes de elevação e para aumentar a eficiência em alguns tipos de processamentos. Uma rede TIN é uma estrutura de subdivisão planar em que as arestas são segmentos de reta e os polígonos são sempre triangulares. São usadas para modelar superfícies tridimensionais em geral, mas seu uso mais comum é na modelagem de terrenos. Diferentemente das matrizes de elevação essas redes permitem a introdução de informação adicional em áreas de relevo complexo, evitando a necessidade de grandes quantidades de dados redundantes (BURROUGH e MCDONNELL, 1998; Maune, 2007).

O processo de captura de dados pode seguir uma situação ideal, de forma que os vértices dos triângulos coincidam com pontos notáveis do terreno (picos, depressões, pontos de inflexão e linhas de descontinuidades) e as arestas percorram feições lineares como fundos de vales, drenagens, cristas, cumeadas e divisores de águas. Assim, haverá uma densidade variável de triângulos, privilegiando as regiões onde a superfície é mais complexa, e permitindo que áreas planas sejam representadas por meio de poucos dados. As redes TIN são criadas a partir de pontos de amostras, usando algoritmos de triangulação. O algoritmo de triangulação de Delaunay é o mais empregado porque tem a

propriedade de maximizar o menor ângulo interno do conjunto, de triângulos, formado, tornando-os mais equiláteros possíveis e evitando a construção de triângulos com formato alongado (CÂMARA et al., 2001; ZHOU et al., 2008).

A partir das amostras o algoritmo de Delaunay cria uma triangulação contida no fecho convexo dos pontos amostrais, e a superfície é aproximada pelos triângulos tridimensionais formados. Como os três vértices de um triângulo definem um plano, equivale a imaginar que o relevo varia linearmente entre dois pontos cotados conhecidos, o que é uma hipótese suficiente e razoável para a maioria das aplicações. Se o grau de aproximação obtido não for satisfatório, pode-se adensar a malha de triângulos, introduzindo novos pontos. A Figura 2.3 mostra duas representações de redes triangulares irregulares para dados de altimetria. Na Figura 2.3-b, a imagem de relevo sombreado ao fundo, mostra a maior densidade da triangulação nos locais de relevos mais acidentados.

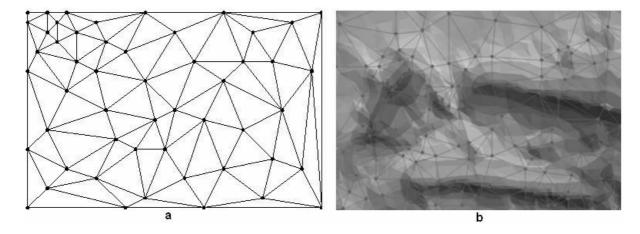


Figura 2.3 – (a) Vista em planta de MDE em estrutura de rede triangular irregular (TIN).

(b) MDE em rede TIN com imagem de relevo sombreado mostrando a densidade variável da triangulação de acordo com a variação do relevo.

O mesmo processo descrito para o relevo pode ser usado para tratar outras variáveis de distribuição espacial contínua, medidas por amostras discretas, tais como temperatura, índice pluviométrico ou ruído ambiental. Segundo Assad e Sano (1998), as principais características das redes de triângulos irregulares (TIN) são: 1) Elementos triangulares continuamente conectados com vértices nos próprios pontos de amostragem e construídos com base na triangulação de Delaunay. 2) Necessidade de registro da

topologia explicitamente através de estruturas vetoriais de forma similar à estrutura de redes de polígonos. 3) Diminui a redundância de dados amostrais, necessitando poucos pontos para atingir uma precisão satisfatória de representação da paisagem (vales, drenagens, cumeadas, picos, e pontos de mudanças de declive) e se ajusta facilmente à complexidade do relevo. 4) Grades regulares podem ser geradas e adensadas a partir de malhas TIN, utilizando diferentes métodos de interpolação de acordo com a variável a ser modelada.

#### 2.2.2 Fontes de dados e produtos derivados das análises de MDE

Os dados de entrada para geração de MDE em qualquer tipo de estrutura de representação são, essencialmente, as posições tridimensionais dos pontos de amostras, por exemplo, coordenadas Este, Norte e Altitude no sistema UTM. Estes dados podem ser originados a partir de diferentes fontes. No caso específico dos modelos de elevação altimétricos as fontes principais são: 1) levantamentos de campo através de métodos topográficos e geodésicos convencionais ou com uso de receptores do sistema GPS; 2) digitalização de curvas de níveis e pontos cotados a partir de mapas, cartas e plantas topográficas existentes; 3) métodos fotogramétricos que utilizam restituidores e aerotrianguladores analíticos, analógicos e digitais; 4) satélites de sensoriamento remoto, ativos e passivos, com capacidades estereoscópicas, tais como os sistemas SPOT, Ikonos, Quick Bird, ASTER e alguns radares; 5) interferometria de imagens de radar aerotransportados e orbitais; e 6) sistemas ativos de perfilamento e varredura a laser (LIDAR).

A maioria destas fontes listadas, geralmente, fornece abundância de elementos amostrais, portanto, métodos de interpolação locais, simples e lineares, têm sido adequados para estimar os dados destinados à geração do MDE na forma e resolução adequados para representação da superfície hipsométrica, não havendo necessidade de usar métodos complexos na interpolação das amostras (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Os MDEs são aplicados em diferentes áreas das ciências da Terra, para atender a demandas de comunidades variadas. Para fornecer uma visão geral das nomenclaturas e termos utilizados nas diferentes demandas de aplicações, faz-se a seguir uma breve

descrição dos produtos mais comuns derivados de análises de MDE para usos em diferentes áreas aplicações (MAUNE, 2007; PECKHAM e GYOZO, 2007).

<u>Modelo Digital de Elevação</u> – MDE (ou DEM – *Digital Elevation Model*): é o termo utilizado quando a superfície modelada refere-se a uma variável genérica. Assim, o MDE é o modelo matemático contínuo que representa a forma da superfície, ou seja, a variável considerada na aplicação em função das suas coordenadas cartográficas. Às vezes é também referido como modelo numérico de elevação (MNE).

<u>Modelo Digital de Terreno</u> - MDT (ou DTM – *Digital Terrain Model*): é o termo utilizado quando a superfície modelada refere-se ao terreno natural, nu e desprovido dos demais elementos de cobertura do solo como árvores, edificações, objetos artificiais, etc. Às vezes é também referido como modelo numérico de terreno (MNT).

<u>Modelo Digital de Superfície</u> - MDS (ou DSM – *Digital Surface Model*): é o termo utilizado quando a superfície modelada refere-se ao terreno incorporando todos os objetos que compõem a cobertura do solo como a vegetação, edificações e outros elementos de cobertura do terreno. Às vezes é também referido como modelo numérico de superfície (MNS).

<u>Modelo Digital de Alturas</u> - MDA (ou DHM – *Digital Height Model*): é o termo utilizado quando se faz a diferença entre um MDS e um MDT. Pode ser, por exemplo, um MDA de árvores representando a altura da mata quando se tratam de aplicações de florestas, um MDA de cortes e aterros em aplicações de Engenharia Civil e atividades de mineração. No decorrer deste trabalho de pesquisa foi extraído um MDA da cobertura da floresta da região de estudo que é discutido com detalhes nos próximos capítulos.

<u>Blocos-Diagrama e Perfis de Superfície</u> - Os Blocos-diagrama constituem uma forma visualmente eficiente de mostrar a distribuição contínua de uma variável quantitativa no espaço geográfico através de uma visão perspectiva e realista. São produtos muito úteis para mostrar vários tipos de informação da paisagem e podem ser usados como suporte para intervenção no ambiente antecipando possíveis impactos e efeitos na paisagem. A construção de um Bloco-diagrama requer a especificação de um ponto de observação e o fator de exagero da escala vertical. Perfis verticais, que são cortes no modelo através de

planos verticais, podem ser produzidos para complementar as análises dos Blocosdiagrama permitindo maiores níveis de detalhamento para estudos de situações específicas.

Estimativa de Volumes de Corte/Aterro - Muitos problemas de Engenharia Civil requerem a modelagem do terreno para estimar os cortes e aterros necessários para obras de intervenção na paisagem. Estimativas precisas dos materiais devem ser calculadas para avaliação de custos, planejamentos e impactos. Várias operações e possibilidades podem ser consideradas. Em uma situação típica constrói-se um MDT do terreno natural antes da obra começar e um MDT do terreno considerando a obra proposta. Pela diferenciação de ambos pode-se estimar o material removido ou adicionado.

<u>Curvas de Níveis</u> - Curvas de Níveis podem ser facilmente obtidas nos modelos de grade regular, reclassificando células nas classes apropriadas de altitudes e atribuindo cores ou tons de cinzas as diferentes classes. Algoritmos de concatenação, afinamento e suavização podem ser utilizados para melhorar os resultados. Nos modelos TIN as curvas de níveis são facilmente obtidas pela interseção de planos horizontais com a malha triangular e posteriormente submetidas a algoritmos de suavização para quebrar o aspecto anguloso das curvas produzidas.

<u>Mapas de Visibilidade</u> - Estes produtos são muito importantes para operações militares e planejamento de redes de comunicação. Podem ser obtidos a partir de grades regulares ou redes de TIN pela varredura de raios que começam no ponto de observação e são dirigidos a todos os pontos do modelo. Todos os pontos não escondidos por outras células do modelo são codificados como visíveis no mapa. Elementos da paisagem podem ser acrescentados ao modelo para levar em consideração seus efeitos na intervisibilidade da paisagem.

Mapas de Declividade, Exposição, Convexidade e Concavidade – Com as altitudes do terreno representadas em grades regulares ou redes TIN, é possível usar diferentes procedimentos para extrair declividades e outros atributos da forma do terreno que são muito úteis para diversos estudos. Declividade, máximo declive ou gradiente é a maior taxa de variação de altitude do plano tangente à superfície modelada pelo MDE. Não existem classes padronizadas para declividade, variando de região para região e de

aplicação para aplicação, entretanto seis classes geralmente costumam dar resultados muito satisfatórios. Exposição ou aspecto é o azimute da direção da linha de máximo declive do plano tangente à superfície modelada pelo MDE. O aspecto geralmente é dividido em oito classes padronizadas N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, acompanhando as direções da rosa dos ventos. Convexidade é taxa de variação da declividade do terreno quando positiva, ou seja, quando a declividade aumenta progressivamente. Concavidade é taxa de variação da declividade do terreno quando negativa, ou seja, quando a declividade decresce à medida que se avança no terreno. Esses atributos são muito importantes para estudos de geomorfologia.

Mapas de Relevo Sombreado - Os mapas de relevo sombreado podem realçar muito o realismo dos resultados finais onde os aspectos tridimensionais podem ser precisamente retratados. O princípio básico do mapeamento automático de relevo sombreado é baseado em um modelo onde o terreno é feito de um material ideal, iluminado a partir de certa posição, usualmente 45 graus acima do horizonte na direção Nordeste. O resultado se assemelha a uma foto aérea, embora seja conceitualmente diferente em vários aspectos.

Extração Automática de Feições da Paisagem - A drenagem e os divisores de águas podem ser derivados do MDT por meio de procedimentos automáticos. Para detectar divisores é necessário identificar todos os locais de convexidade para baixo (\(\cappa\)). Para o caso de drenagens devem ser identificados os locais de concavidade para cima (\(\cui\)). Para delimitar o contorno de uma bacia é necessário achar todos os locais de convexidade para baixo (\(\cappa\)) nos limites externos da bacia. A busca do limite da bacia pode ser feita por meio de algoritmos recursivos começando na foz do canal principal.

Geração de Ortofotos Digitais com Auxílio de MDT – A fotografia aérea vertical é uma projeção de perspectiva central onde os objetos da Terra são ampliados ou reduzidos conforme estiverem mais ou menos elevados em altitude, assim a escala da fotografia diferentemente de um mapa é variável em cada ponto. A geração tradicional de ortofotografias ou de ortofotocartas é um processo óptico mecânico em que são juntados em uma única foto pequenos fragmentos de aerofotos convencionais, com o objetivo de formar uma imagem única, em projeção vertical isenta das variações de escala causadas pela variação do relevo do terreno (LILLESAND e KIEFER, 1999). As técnicas de

ortofotografia digital aperfeiçoaram e simplificaram este processo. Em vez do processo analógico de seleção de fragmentos da fotografia, é formado um modelo matemático para cada foto, considerando os parâmetros da câmara aérea, do vôo e as informações do relevo do terreno por meio de um MDT. Este modelo matemático composto é utilizado por um algoritmo que é aplicado sobre cada pixel da imagem original da fotografia aérea formando uma imagem digital ortorretificada. As imagens ortorretificadas são então combinadas, formando ortofotos digitais, similares às ortofotos tradicionais. O resultado final do processo é uma imagem digital que pode ser utilizada diretamente por um SIG de base *raster*, ou utilizada como informação de fundo de SIG vetoriais. Os principais parâmetros a determinar na formação de ortofotos digitais são a resolução desejada para a imagem final e o grau de refinamento do modelo digital do terreno que se pretende utilizar na ortorretificação da imagem. Imagens de maior resolução e MDT mais refinados produzem ortoimagens mais precisas, embora resultem maiores e sejam mais difíceis de processar.

# 2.2.3 Qualidade e confiabilidade de um MDE

Não existe MDE perfeito ou ideal que atenda a todos os propósitos, pois qualquer que seja a técnica utilizada na sua construção o MDE não será capaz de representar toda a complexidade da superfície do terreno, nem em termos de detalhes nem em termos de fidelidade geométrica. Sempre haverá problemas, tanto na amostragem quanto na representação e, consequentemente, também nas análises derivadas dos modelos. A qualificação e quantificação dos erros associados a um MDE ainda são objeto de muitas investigações que podem ser comprovadas pelo grande volume de trabalhos encontrados na literatura, dentre os quais podem ser citados: El-Sheimy (1999); Rees (2000); Wechsler (2003); Widayati et al. (2004); Wood e Fisher (1993).

A qualidade de um MDE está diretamente relacionada a vários fatores dentre eles a própria superfície que se quer representar; sua extensão; tipo de cobertura do solo; tipo de relevo (plano, suave, moderado ou movimentado); densidade e distribuição dos pontos amostrais; tipo de grade (regular ou irregular) utilizada na geração do MDE; método de interpolação utilizado na estimativa dos outros pontos da grade; e a resolução espacial do

modelo final. Portanto, cada elevação estimada em um MDE contém erros devidos à técnica e aos dados (conjunto de pontos amostrais) utilizados na sua geração.

Estudos comprovam que a distribuição espacial dos erros de elevação tem influência nas operações locais que são executadas nos MDEs (FISHER, 1998; HEUVELINK, 1998; HUNTER e GOODCHILD, 1997). Parâmetros do terreno baseados na primeira ou segunda derivada da superfície do MDE, tal como a declividade, o aspecto, e a curvatura da superfície, são particularmente influenciadas pela autocorrelação espacial dos erros do MDE. Os erros sistemáticos autocorrelacionados são potencialmente mais graves, pois devido ao seu elevado nível de dependência espacial, seus efeitos influenciam fortemente a estimativa dos parâmetros topográficos locais, calculados a partir dos MDEs, em áreas de baixo relevo generalizado. São muito susceptíveis em afetar negativamente quaisquer possíveis aplicações subseqüentes de SIG feitas com base nesses parâmetros topográficos locais.

Embora, as necessidades, os requisitos e as especificações dos MDEs e seus produtos derivados sejam muito difíceis de determinar devido a seus múltiplos usos por diferentes comunidades, a disponibilidade de MDEs globais para usos gerais é um desejo forte dos pesquisadores que lidam com a modelagem de processos naturais e ambientais. Para suprir parcialmente este anseio, a geração de modelos de elevação de abrangência global foi realizada pela missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), embarcada no ônibus espacial *Endeavour* em fevereiro de 2000. Outros projetos que resultam na produção de MDEs de uso geral têm sido encaminhados e planejados para os próximos anos (SUN et al., 2003).

## 2.3 Interferometria SAR (InSAR) na geração de modelos tridimensionais

Um dos principais objetivos da presente pesquisa de tese tem seu enfoque centrado na identificação de erros em modelos de elevação para aplicação de métodos adequados de correções. Os MDEs do estudo foram gerados pela técnica de interferometria SAR (InSAR) em região de floresta na Amazônia. As correções incluem a identificação e o tratamento de erros globais, erros locais e erros pontuais, decorrentes de diversos fatores de natureza interna e externa, que ocorrem em várias fases da formação dos modelos

InSAR. Assim, para melhor compreensão do problema alguns aspectos da técnica InSAR são apresentados.

O Radar de Abertura Sintética (SAR) é uma técnica que se utiliza de uma antena radar de tamanho reduzido e simula uma antena de longo comprimento pela combinação dos ecos recebidos pelo sensor à medida que este se move ao longo da trajetória de vôo. O sensor radar é instalado em uma plataforma aerotransportada ou orbital, envia pulsos de microondas modulados linearmente em freqüência a intervalos regulares de tempo e o imageamento é feito em geometria de visada lateral. Quanto maior a antena, mais informações podem ser coletadas sobre um determinado alvo, possibilitando obter uma imagem de melhor resolução. Uma antena SAR transmite pulsos do radar a uma taxa constante, várias centenas de pulsos são transmitidas enquanto o avião ou a espaçonave se deslocam sobre um objeto particular, conseqüentemente várias respostas de retroespalhamento do mesmo objeto são obtidas durante o intervalo da abertura sintética.

O recurso da abertura sintética da tecnologia SAR permite que uma antena pequena possa coletar dados e gerar uma imagem de alta resolução através da simulação de uma antena grande, utilizando o efeito *Doppler* produzido pelo movimento da plataforma sobre os ecos dos sinais recebidos. Durante o intervalo de tempo da abertura sintética o eco recebido de cada pulso enviado sofre uma variação de freqüência conhecida como efeito *Doppler* devido à velocidade da plataforma e uma variação de fase causada pela variação da distância ao alvo. A variação de freqüência, chamada largura de banda *Doppler*, define a resolução da imagem SAR, na direção de azimute. Após processamento intensivo dos sinais, gera-se uma imagem cuja resolução na direção de vôo tem as mesmas características de uma imagem obtida por uma antena física de grande comprimento. O comprimento da abertura sintética é equivalente à distância percorrida pela aeronave enquanto um dado objeto específico estiver no campo visual da antena física que coleta informação sobre o objeto.

O SAR é um sistema coerente de imageamento, ou seja, grava a informação de fase e de intensidade dos sinais de microondas que retornam de cada célula de resolução no solo. Assim, cada imagem SAR é composta de uma grade regular de valores complexos z compostos de uma parte real  $\Re(z)$  e uma parte imaginária  $\Im(z)$  que podem ser

decompostos em uma componente I de amplitude, dada pela Equação 2.1 e em uma componente  $\varphi$  da fase, dada pela Equação 2.2 (HANSSEN, 2001).

$$I(z) = ((\Re(z))^2 + (\Im(z))^2)^{1/2}$$
(2.1)

$$\varphi(z) = Arctan(\Re(z)/\Im(z)) \tag{2.2}$$

As imagens SAR de intensidade fornecem informações sobre a rugosidade da superfície, propriedades dielétricas e o conteúdo de umidade dos alvos iluminados. Superfícies rugosas, por exemplo, agem como refletores difusos que dispersam a energia das microondas incidentes em todas as direções, inclusive de volta para o radar. Portanto, aparecem claras nos dados da imagem. Superfícies lisas, por outro lado, refletem a maior parte da energia para longe da direção de incidência e tendem a aparecer escuras na imagem do radar. As superfícies com inclinação voltada para a direção do radar têm também um retorno mais forte do que as superfícies que se inclinam na direção oposta ao radar e tendem também a aparecer mais brilhantes nos dados da imagem.

Diferentemente da imagem da intensidade, uma única imagem da fase do SAR não fornece qualquer informação útil. A fase medida em cada ponto de uma imagem SAR pode ser interpretada como a soma de duas componentes. Uma componente é devida à contribuição de todos os espalhadores elementares dentro da célula de resolução e uma outra componente é devida à distância de propagação da onda entre o sensor e o objeto e de volta ao sensor. O mecanismo resultante do espalhamento em uma célula de resolução pode ser modelado, sob certas condições, como um ruído branco Gaussiano circular, (BAMLER e HARTEL, 1998; HANSSEN, 2001), onde a fase tem uma distribuição uniforme no intervalo  $[0, 2\pi]$ . Conseqüentemente, uma única imagem de fase do SAR não carrega nenhuma informação útil e é apenas uma imagem de ruído aleatório. Entretanto, a informação da fase em uma imagem SAR torna-se significativa, quando pelo menos duas imagens de fase da mesma área estão disponíveis. Maiores detalhes sobre a técnica SAR podem ser encontrados em Curlander e McDonough, (1991), Hanssen (2001) e Lillesand e Kiefer (1999).

A técnica da interferometria SAR (InSAR) usa pares de imagens de radar para produzir MDEs precisos e de grandes extensões em área. Ela se utiliza da propriedade de coerência entre imagens obtidas pelos modernos sistemas SAR e tem como vantagem a possibilidade de operação diurna e noturna em qualquer condição de tempo, proporcionada pelo imageamento por radar. No método InSAR, a informação da fase é calculada a partir de duas imagens S<sub>1</sub> e S<sub>2</sub>, adquiridas na mesma área e rigorosamente coregistradas com precisão da ordem de subpixel. As medidas tridimensionais da superfície da Terra feitas por interferometria de imagens SAR são obtidas com geometria de visada lateral e podem ser adquiridas a partir de sensores SAR aerotransportados ou carregados a bordo de plataformas espaciais (GENS e GENDEREN, 1996; LIN et al., 1991).

A técnica mais apropriada para a geração de MDE é a interferometria transversal à trajetória (*across track*). Dependendo da banda de microondas utilizada pelo sensor SAR, a aquisição dos dados pode ser feita em uma só passagem, requerendo duas antenas SAR montadas na mesma plataforma para a aquisição simultânea dos dados. Esta opção é conhecida como interferometria de passagem única e é muito comum em plataformas aerotransportadas. A outra opção possível é a interferometria de múltiplas passagens que produz duas ou mais imagens a partir de órbitas ou linhas de vôo diferentes. A fase e a magnitude do retorno do sinal são gravadas e usadas para calcular a altimetria do terreno. Detalhes complementares sobre a técnica InSAR podem ser encontrados em Bamler e Hartl (1998), Gens e Genderen (1996) e Hanssen (2001).

Graham (1974) foi o primeiro a introduzir a técnica de interferometria de imagens de radar de abertura sintética (SAR) para aplicação em mapeamento topográfico. Zebker e Goldstein (1986) apresentaram os primeiros resultados de InSAR com o radar de visada lateral aerotransportado obtidos através da montagem de duas antenas SAR com 11.1 metros de separação (linha de base). A partir dessas experiências muitos sistemas SAR interferométricos foram projetados e construídos. Diversos trabalhos técnicos e científicos foram publicados depois que a Agência Espacial Européia (ESA) lançou o satélite ERS-1 em julho de 1991. A interferometria orbital experimentou uma ótima oportunidade de estudos quando a ESA lançou em 1995 o ERS-2, possibilitando coleta de dados com os dois sensores com apenas um dia de intervalo entre as aquisições, o que passou a se chamar de missão geminada, permitindo a geração de MDE no modo de duas passagens.

As primeiras aplicações de interferometria SAR utilizaram dados não polarimétricos, ou seja, dados de uma só polarização da onda na transmissão e também na recepção. O desenvolvimento tecnológico em radares tem aumentado a disponibilidade de imagens SAR polarimétricas, permitindo que investigações em interferometria SAR polarimétrica sejam realizadas mais facilmente (CLOUDE e PAPATHANASSIOU, 1998; GAMA, 2007; MURA, 2005).

A correlação complexa entre duas imagens SAR adquiridas de posições ligeiramente diferentes fornece o mapa de coerência que é uma medida do grau de correlação entre estes dados. Para a geração de um bom MDE é necessária uma coerência alta. A descorrelação dos dados SAR resulta em uma baixa coerência causando erro no MDE gerado. Diversas causas levam a uma baixa correlação entre as imagens, como a descorrelação da linha de base, ou seja, a descorrelação devido à diferença entre os ângulos de incidência das duas aquisições, a relação sinal/ruído nas imagens, erros de registro entre as imagens, erros introduzidos na geração das imagens SAR, etc. (SAGUÉS et al., 2000). No caso de sensores InSAR aerotransportados a qualidade final dos produtos cartográficos gerados, depende da precisa compensação de movimento da plataforma e do exato georeferenciamento das imagens, obtidos através do uso de sistemas de navegação inercial, *Inertial Navigation System* (INS), e de métodos baseados em GPS diferencial, *Differential Global Positioning System* (DGPS).

As etapas mais importantes na geração de MDEs por meio de interferometria SAR (InSAR) podem ser resumidas nos cinco tópicos a seguir: 1) co-registro das imagens e geração do mapa de coerência; 2) cálculo do interferograma (fase comprimida no intervalo  $-\pi$ , $\pi$ ); 3) remoção do efeito sistemático de fase do terreno plano; 4) refinamentos e geração da fase comprimida; 5) desdobramento da fase que consiste na conversão da fase contida no intervalo ( $-\pi$ , $\pi$ ] para o seu valor real o qual pode ser maior que  $2\pi$  radianos; e 6) geração do MDE usando o processo de geocodificação. A Figura 2.4 ilustra o esquema geral do processo de geração do MDE mostrando o relacionamento das fases de processamento. Os tópicos apresentados são brevemente discutidos no decorrer deste Capítulo.

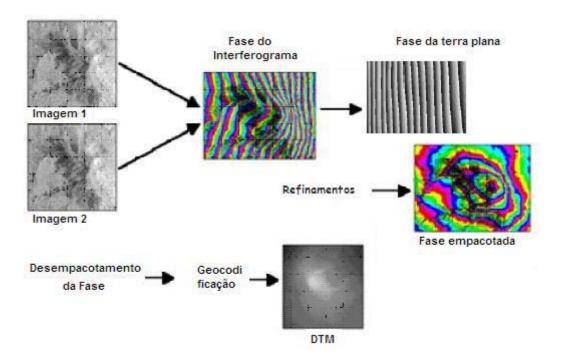


Figura 2.4 – Esquema ilustrativo do processo de geração do MDE pelo método de interferometria SAR.

No método InSAR um par de imagens é adquirido de duas posições diferentes da antena, separadas pela linha de base, portanto, não se sobrepõem perfeitamente. Assim, é necessário que sejam co-registradas antes que outras etapas de processamento sejam executadas (MURA, 2000). A Figura 2.5 ilustra a geometria básica de aquisição de um sistema InSAR.

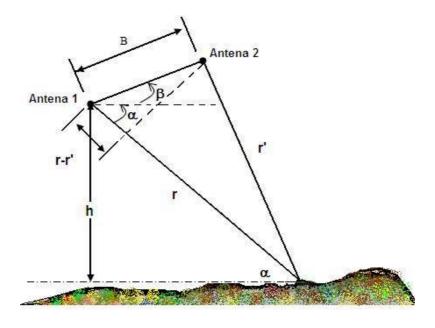


Figura 2.5 – Ilustração da geometria da interferometria SAR (InSAR) para obtenção da altimetria do terreno.

FONTE: adaptada de Zebker e Goldstein (1986).

Pela observação da Figura 2.5 a diferença em *range* pode ser dada pela Equação 2.3.

$$r-r' = B.\cos(\beta + \alpha) \tag{2.3}$$

A altura *h* é dada pela Equação 2.4.

$$h = r.\operatorname{sen}(\alpha) \tag{2.4}$$

A fase medida do interferograma  $\phi$  é expressa pela Equação 2.5.

$$\phi = (r - r') \frac{2\pi}{\lambda} = \delta \rho \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.5}$$

onde h é a altura do sensor no avião; r é a distância do sensor até o alvo;  $\beta$  é o ângulo da linha de base em relação ao plano horizontal;  $\alpha$  é o ângulo de depressão; B é a linha de base;  $\lambda$  é o comprimento de onda; e  $\delta \rho$  é a diferença em range do objeto para as posições das antenas. Combinando as Equações acima (ZEBKER e GOLDSTEIN, 1986) tem-se a Equação 2.6

$$h = r.sen\left(\cos^{-1}\left(\frac{\phi\lambda}{2\pi B}\right) - \beta\right)$$
 (2.6)

que permite a derivação das alturas do terreno necessárias à geração do MDT. No jargão da interferometria SAR a diferença de fase é conhecida como fase interferométrica.

# 2.3.1 Distorções causadas pela geometria de aquisição InSAR que degradam os MDEs

No processo de aquisição de imagens de radar, o sensor mede o tempo que o sinal de microondas gasta desde o instante em que é emitido do radar, passando pela interação com o terreno até a volta a sua origem. Este tempo é convertido para uma distância ao terreno. Assim, trechos do terreno situados em altitudes mais elevadas, encostas de faces

voltadas para o sensor ou encostas de faces opostas ao sensor são deslocadas de suas posições, comprimidas ou ampliadas em suas dimensões (LILLESAND e KIEFER, 1999). Essas distorções são conhecidas pelos termos *foreshortening* ou encurtamento, *layover* ou inversão, e *shadowing* ou sombreamento (CURLANDER e MCDONOUGH, 1991). A Figura 2.6-a ilustra a geometria que causa o encurtamento de rampa, a Figura 2.6-b a geometria que causa a inversão e a Figura 2.6-c a geometria que causa sombreamento nas imagens.

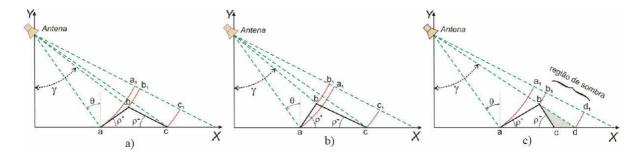


Figura 2.6 - Diferentes tipos de distorções encontradas nos dados InSAR causadas pela geometria de imageamento.

FONTE: Gama (2007).

O encurtamento, a inversão e o sombreamento nas imagens SAR são mais pronunciados em terrenos de alta rugosidade. Tais distorções afetam principalmente a exatidão da fase para conversão da altura e contribuem para aumentar o efeito da descorrelação. Os MDEs derivados de InSAR costumam apresentar muitos problemas em terrenos de alta rugosidade, exigindo uma metodologia de mapeamento que minimize estes problemas.

#### 2.3.2 Métodos de aquisição de dados SAR interferométricos

A coleta de dados para interferometria SAR pode ocorrer de três maneiras principais: Interferometria transversal à trajetória, interferometria longitudinal à trajetória e interferometria de repetição da trajetória, também chamada passagem repetida ou múltiplas passagem (GENS e GENDEREN, 1996). Cada um desses métodos foi desenvolvido e tem sido utilizado para aplicações diferenciadas que procuram explorar as potencialidades do sensor e as características da aplicação específica para a qual os dados são destinados.

A modalidade de passagem única é, via de regra, empregada somente em sistemas aerotransportados, pois requer duas antenas SAR montadas em uma única plataforma, o que dificulta a sua implementação em satélites devido a limitações técnicas. Ambos os sistemas de radar, transportados por via aérea e orbital, podem ser usados na modalidade da passagem repetida. A interferometria de passagem repetida requer somente uma antena e por isso é o método mais adequado para sensores SAR orbitais. Neste método é necessário o conhecimento da posição precisa da trajetória de vôo e os satélites tipicamente possuem trajetórias orbitais precisas e estáveis na ausência da atmosfera, o que reforça sua adequação a sensores SAR orbitais.

No caso da passagem repetida cada trajetória tem seu movimento próprio, o que torna a interferometria muito mais sensível à eficiência da compensação do movimento, onde os erros correspondentes têm que ser corrigidos durante o processamento de dados (BAMLER e HARTL, 1998). O avião ou a espaçonave que carrega sensores SAR grava também, simultaneamente, os dados do sistema de posicionamento global que opera no modo de correção diferencial (DGPS) e os dados dos sistemas de navegação inercial (INS), transportados a bordo para determinar a posição geográfica, a rolagem, o mergulho e a guinada da plataforma (HODGSON et al., 2003). Esses dados são usados no processamento para as correções e refinamentos.

#### 2.3.3 Processamento dos Dados Interferométricos

A geração de um MDE por interferometria SAR é composta de várias etapas de processamento, cada uma delas introduz erros associados aos algoritmos utilizados. A primeira etapa de processamento é a geração da imagem SAR por meio dos algoritmos de focagem dos dados brutos (CURLANDER e MCDONOUGH, 1991; MCDONOUGH et al., 1985).

A etapa seguinte é o co-registro do par de imagens complexas, com uma precisão da ordem de subpixel (FORNARO et al., 1994; LIN et al., 1991). As imagens co-registradas são filtradas para que o interferograma seja menos ruidoso (MURA et al., 1997), a imagem interferométrica é obtida multiplicando-se uma das imagens pelo complexo

conjugado da outra, o interferograma é obtido pela fase de cada pixel da imagem interferométrica.

Os valores de fase do interferograma estão compreendidos entre  $-\pi$  a  $\pi$ , também conhecida como fase módulo  $2\pi$ , o processo de transformação para a fase absoluta é chamado de desdobramento de fase, os métodos empregados nesta transformação são conhecidos por métodos locais (GOLDSTEIN et al., 1988) e os globais (GHIGLIA et al., 1997; GHIGLIA, 1991; GHIGLIA e ROMERO, 1994; ZEBKER e LU, 1998).

O interferograma desdobrado apresenta um "offset" de fase 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. Outros fatores que contribuem para a existência do "offset" de fase são as incertezas na medida do tempo de atraso de retorno do pulso do radar, desvios na amostragem dos dados, variações no atraso de propagação devido a mudanças na ionosfera, etc. (GOLDSTEIN et al., 1988). Este "offset" de fase pode ser determinado por meio do uso de refletores de canto ou por métodos numéricos interativos (HOLECZ et al., 1997; MURA, 2000).

A etapa final de processamento para a geração do MDE consiste na geocodificação dos dados interferométricos que é realizado a partir da informação da fase desdobrada, do vetor de estado da plataforma (efemérides), da resolução das equações de *Range/Doppler* e da equação do elipsóide representativo do modelo geodésico de referência terrestre (HOLECZ et al., 1997; WIMMER et al., 2000). A exatidão dos dados de trajetória do satélite (efemérides) ou de vôo da aeronave, utilizando sistema GPS/INS (Inertial Navigation System), é essencial para a geração de MDE de alta qualidade.

### 2.3.4 Coerência interferométrica como controlador na geração do MDE

O mapa de coerência derivado das imagens interferométricas co-registradas indica as áreas onde existe uma baixa correlação entre as imagens causada por diversos fatores, entre os principais estão: as distorções geométricas do tipo inversão e sombra, descorrelação devido à diferença entre os ângulos de incidência das duas aquisições, a relação sinal/ruído, erros de registro entre as imagens, erros introduzidos na geração das

imagens SAR (CLOUDE e PAPATHANASSIOU, 1998; ZEBKER e VILLASENOR, 1992).

A coerência fornece uma medida do ruído da fase no interferograma. Ela é estimada pelo cálculo, com base em uma janela, do modulo do coeficiente de correlação cruzada complexo das imagens SAR que é dado por (HANSSEN, 2001):

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{\sum_{n=1}^{N} S_1^{(n)} S_2^{*(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} |S_1^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^{N} |S_2^{(n)}|^2}} \qquad 0 \le \gamma \le 1$$
(2.6)

onde N é o número de pixels na janela

O módulo do coeficiente de correlação varia entre 0 e 1. Áreas com alto grau de correlação facilitam o desdobramento de fase e proporcionam a geração de MDEs exatos. Em geral, em áreas onde o módulo é menor que 0.7, o processo de geocodificação não é realizado, ou seja, não se gera o MDE, evitando erros indesejáveis (MURA, 2000).

# 2.3.5 Capacidades ampliadas do método InSAR para melhoria da produção de MDE

Até aqui foram abordados os conceitos, princípios e técnicas do método InSAR considerado convencional para obtenção de MDE. Para completar a visão geral do assunto será feita uma breve discussão sobre a utilização das técnicas de polarização e uso de várias freqüências na aplicação de InSAR. Estes tópicos representam complementos e inovações importantes que resultam no aumento do potencial de contribuição para a qualidade e aplicabilidade dos MDEs InSAR.

Polarização é o termo usado para descrever a forma como uma onda eletromagnética oscila enquanto se propaga no espaço. Para a maioria dos sistemas SAR, somente uma polarização pode ser transmitida ou recebida. A antena transmissora determina o tipo de polarização da onda emitida, e a antena de recepção determina qual a polarização do sinal retornado será gravada.

A polarimetria trata da natureza do vetor completo de ondas eletromagnéticas polarizadas no espectro de freqüências. Polarimetria completa significa que as ondas do radar são transmitidas e recebidas em polarização horizontal (H) e em polarização vertical (V) para um comprimento de onda. As diferentes modalidades de polarização são VV, HH, HV e VH onde a primeira letra representa o canal transmissor e a segunda o canal de recepção (BOERNER e YAMAGUSHI, 2000). Estas modalidades de polarização dão informação mais completa sobre diversos temas tais como a altura e a biomassa da camada de vegetação.

Um dos objetos de estudos atuais é a utilização de dados SAR multipolarizados para fazer estimativas melhores da coerência permitindo gerar um interferograma SAR com menor nível de ruído e conseqüentemente produzir um MDE de melhor qualidade. Neste caso as imagens utilizadas são adquiridas em modo polarizado e algumas propriedades de polarimetria são utilizadas na geração de um MDE de qualidade melhorada. Segundo Ouarzeddine, (2002) o uso de dados inteiramente polarimétricos para otimização da coerência resultará em uma solução de qualidade otimizada para o MDE. As contribuições dos diferentes retroespalhamentos do terreno em diferentes polarizações, proporcionam à interferometria usar uma combinação das diferentes polarizações para melhorar a coerência. Combinando interferometria e polarimetria é possível maximizar a coerência interferométrica, que dá o grau de correlação complexa entre as duas imagens, e por conseqüência a melhoria da fase interferométrica, visando à geração de modelos de elevação mais precisos. A otimização polarimétrica da coerência interferométrica foi explorada e matematicamente formulada por Cloude e Papathanassiou (1998).

Outro aspecto que aumenta as possibilidades de aplicações de InSAR na produção de MDE é a utilização de várias freqüências, acarretando bandas de diferentes comprimentos de ondas, tais como, as bandas X, C, L e P. Esta combinação de diferentes

bandas tem se revelado muito útil, tirando proveito dos diferentes modos de interações das radiações com os elementos de retroespalhamento do terreno. Exemplos de aplicações de InSAR multifreqüência e multipolarimetria podem ser vistos em Dutra et al. (2002) e Timbó Elmiro et al. (2003, 2007a,b). Nestes trabalhos foram utilizados dados gerados durante uma campanha no ano 2000, organizada pelo INPE, Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) do Exercito Brasileiro e pela empresa alemã *AeroSensing Radar Systeme GmbH*, na região da Floresta Nacional de Tapajós, com radar interferométrico operando nas bandas P e X. No trabalho, foram coletados dados para interferometria em banda P de duas passagens e em banda X de passagem única, tendo sido produzidos modelos digitais de elevação (MDE). A radiação da banda X não penetra na massa de vegetação, portanto, o MDE resultante refere-se ao topo da floresta. Já a radiação da banda P, de maior comprimento de onda, penetra na massa de vegetação indo atingir o solo de onde é retroespalhada, gerando potencialmente um MDT relativo ao chão da floresta, livre da interferência da cobertura florestal.

# 2.3.5.1 SRTM como exemplo do potencial InSAR para produção global de MDE

Uma aplicação bastante difundida de interferometria SAR em duas freqüências para mapeamento global do planeta realizado nas bandas X e C do espectro das microondas foi proporcionada pela missão SRTM. A missão SRTM foi patrocinada pela NASA, JPL e NIMA com objetivo de levantar dados globais de altimetria do planeta por meio de interferometria SAR. O objetivo da missão foi obter a base de dados topográfica digital de alta resolução mais completa da Terra. Os dados do SRTM constituem o mapeamento topográfico global mais completo já feito até agora, entre 60° de latitude norte e 56° de latitude sul. Os produtos de mapeamento topográficos digitais obtidos estão de acordo com as especificações para dados de alturas interferométricas do terreno: na amostragem espacial de 30 x 30 m, a exatidão da altura vertical absoluta é de 16 metros e a exatidão horizontal absoluta (erro circular de 90%) é de 20 metros (SUN et al., 2003).

O SRTM consistiu em um sistema do radar especialmente modificado que voou a bordo do ônibus espacial *Endeavour* durante uma missão de 11 dias em fevereiro de 2000. O sistema usado na missão SRTM foi composto pela eletrônica do radar e por quatro

antenas, sendo uma antena em banda C e uma em banda X, instaladas no corpo principal do ônibus espacial, e as outras duas antenas em banda C e em banda X, montadas na extremidade de um mastro telescópico de 60 metros de extensão. A posição e orientação das antenas, necessárias para interferometria, foi garantida por diversos instrumentos de forma a atingir os requisitos de precisão relativa vertical e horizontal nos MDEs resultantes.

A Figura 2.7-a ilustra de forma esquemática e sem escala a base conceitual do sistema SRTM. A Figura 2.7-b mostra uma imagem em tons de cinza de um MDE InSAR extraído da missão SRTM. O MDE foi produzido em banda C cobrindo um trecho da Floresta Nacional de Tapajós que abrange a área de estudo deste trabalho de pesquisa de tese. Este modelo em banda C da área de estudo fornecido pela missão SRTM foi usado como informação auxiliar em algumas fases do trabalho de pesquisa de tese. Descrições mais completas da missão SRTM e detalhes dos produtos gerados podem ser obtidos em Farr e Kobrick (1999), Senus (2000) e Sun et al. (2003).

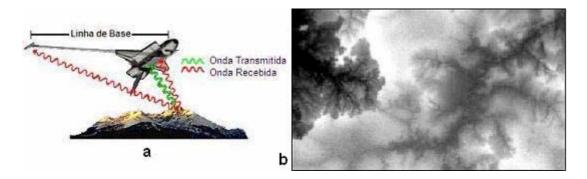


Figura 2.7 – (a) Esquema do sistema SRTM, (b) MDE SRTM banda C de Tapajós. FONTE: modificada de USGS http://srtm.usgs.gov/.

#### 2.3.5.2 Sistema InSAR aerotransportado para geração de MDE

Nos sistemas de mapeamento InSAR aerotransportados, tal como o sistema AeS-1 que foi utilizado na coleta dos dados desta pesquisa de tese na Floresta Nacional de Tapajós, tipicamente o processamento SAR começa com a leitura dos dados radar coletados e dos dados de navegação gravados pelo sistema em meio magnético e com a subseqüente

determinação das trajetórias de referência do vôo. Usando um algoritmo de processamento do tipo *range/doppler* ambas as séries de dados são comprimidas, incluindo a compensação precisa do movimento, em imagens SAR complexas de um *look* simples.

Para gerar faixas longas de imagens, maiores que cinco quilômetros, os dados brutos contínuos são separados em partes que se sobrepõem. Os dados brutos podem ser opcionalmente filtrados para corrigir problemas, se houver quaisquer distúrbios presentes. O processador interferométrico realiza o co-registro preciso das imagens, a formação do interferograma, o desdobramento da fase, e finalmente a conversão de fase para altura do terreno.

Os produtos típicos são a imagem de magnitude SAR, o interferograma, o mapa de coerência, e os dados de elevação na geometria de alcance inclinado (*slant range*). As faixas completas de imagens são produzidas concatenando as partes individualmente processadas. A geração do modelo de elevação geocodificado para uso cartográfico e análises geográficas inclui a projeção dos produtos das imagens em alcance inclinado (*slant range*) para uma grade de referência cartográfica, comumente usa-se o sistema de projeção UTM.

A produção de mapas topográficos geralmente requer ambos os produtos SAR, a imagem de magnitude geocodificada e o modelo digital de elevação. As imagens SAR ortorretificadas e os modelos digitais de elevação são analisados e processados por meio de algoritmos de classificação e de reconhecimento de padrões, produzindo-se mapas de classes independentes, tais como água, floresta, área urbana, agricultura, e outros tipos de coberturas. Curvas de níveis e outros atributos do relevo são extraídos dos MDEs. Os resultados são vetorizados em níveis de informações separados, resultando o mapa topográfico no formato digital em diversos níveis ou planos de informação. Mapas topográficos compatíveis com escalas até 1:2000 podem ser gerados com sistemas InSAR aerotransportados (HOLECZ et al., 1997; MOREIRA, 1996).

#### 2.3.6. Interação dos fatores e processos de degradação dos MDEs InSAR

Muitos fatores que prejudicam a qualidade final do MDE derivado do método InSAR, responsáveis pela introdução de erros que provocam diferentes efeitos, já foram brevemente apresentados em seções antecedentes, sendo que alguns deles já foram amplamente discutidos na literatura de referência (MURA et al., 1997; CLOUDE e PAPATHANASSIOU, 1998; OUARZEDDINE, 2002; HODGSON et al., 2003; GAMA, 2007). Segundo Mura (2000), dentre as incertezas comuns que degradam o MDE podem ser destacadas as seguintes fontes de erros: 1) Incerteza na medida de "range", que é causada pelo desvio na frequência de amostragem dos dados e pela variação no atraso de propagação do sinal do radar, devido a mudanças na ionosfera. 2) Incerteza na determinação da altura da antena de referência. 3) Incerteza na determinação da componente vertical da linha de base. 4) Incerteza na determinação da componente horizontal da linha de base. 5) O "offset" de fase, associado principalmente à célula de resolução do radar, que normalmente é bem maior que o comprimento de onda do sinal transmitido, provocando erro sistemático no MDE. 6) O ruído térmico, associado ao receptor do sistema radar que 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). 7) O Ruído "speckle" que 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, exista 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 à seção transversal média do radar na superfície. As variações súbitas na intensidade da imagem caracterizam o ruído "speckle". 8) A descorrelação devida à linha de base, acontece quando se combina os pixels de duas imagens adquiridas com geometrias ligeiramente diferentes, para se extrair a diferença de fase. 9) A descorrelação temporal, é um importante fator de decréscimo da correlação entre as imagens utilizadas na geração do interferograma. A descorrelação temporal acontece em sistemas de duas passagens, devido às mudanças físicas na superfície imageada que ocorrem no intervalo de tempo entre as aquisições. 10) Os erros de processamento que são devidos aos erros introduzidos durante a geração da imagem SAR interferométrica e no processo de registro das imagens.

Todos os problemas abordados, além de outros que ainda não foram muito bem compreendidos e inteiramente caracterizados, decorrem da interação de diferentes fontes. São devidos à participação conjunta de vários processos e dispositivos complexos (unidades individuais de medição como o sistema SAR, o GPS e o INS, integração dessas unidades, calibração das partes e do sistema como um todo, cobertura do solo e características do terreno, trajetória da plataforma, etc.) que interagem desde a emissão do pulso até a produção final da informação. Esses fatores agindo isoladamente, interativamente ou mesmo parcialmente integrados afetam a qualidade dos MDEs de maneiras diversas.

Para fins deste trabalho de tese, mais importante do que fazer uma discussão exaustiva da caracterização e interação dessa extensa lista de fatores que induzem erros, é fazer uma síntese dos seus efeitos no MDE, visando definir as estratégias de correção adequadas. Assim, as incongruências incorporadas ao MDE como resultado final da ação dos diferentes fatores de degradação são classificadas, para fins do nosso estudo, em três categorias: 1) erros globais, 2) erros locais e 3) erros pontuais.

#### 2.3.6.1. Erros globais

Erros globais podem ser caracterizados como sendo os erros que afetam a exatidão absoluta e geral do MDE em toda a sua extensão geográfica. Esses erros representam a incerteza geral da posição de um ponto qualquer em relação a sua posição geográfica real na superfície da Terra, ocasionada pela presença de erros aleatórios e sistemáticos que não foram corrigidos em toda a extensão do MDE. São erros que costumam ser caracterizados na forma de erro linear no nível de confiança de 90% ou 95%, fornecidos na forma da estatística da Raiz do Erro Médio Quadrático (EMQ), também chamada *Root Mean Squared Error* (RMSE) ou do Erro Médio Absoluto (MAE). Estatísticas de RMSE são essencialmente um desvio padrão e, assim, são baseadas na suposição de que os erros no MDE são aleatórios e normalmente distribuídos (WEYDAHL et al., 2007). Considerando que na modelagem do terreno, geralmente são usadas amostras grandes e

que a maior parte das características naturais são resultados da interação de diversos fatores, na grande maioria das vezes nos deparamos com a distribuição normal de amostras. O RMSE mede a dispersão da distribuição de frequência dos desvios entre os dados de altitudes de pontos de controle e dados do MDE, sua expressão matemática é dada pela Equação 2.7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} (h_T - h_S)^2}$$
 (2.7)

A expressão matemática do MAE é dada pela Equação 2.8.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} |(h_T - h_S)|$$
 (2.8)

onde N é o total de pontos de controle utilizados,  $h_T$  é posição altimétrica real do ponto de controle medida por métodos de campo e  $h_S$  é a posição altimétrica proveniente da medida do radar, extraída do modelo digital de elevação (TIMBÓ ELMIRO et al., 2003). Assume-se que os erros globais são válidos para o modelo inteiro.

#### 2.3.6.2 Erros locais

Erros <u>locais</u> têm efeitos e formulações matemáticas parecidas com os erros globais, porém são caracterizados por afetarem a exatidão do MDE somente em partes específicas da sua extensão geográfica (WEYDAHL et al., 2007). O tratamento de erros locais costuma aumentar a complexidade do problema de correção do MDE, por isso uma forma comum de lidar com essa complexidade é simplesmente restringir o espaço de abrangência da correção. O campo de atuação da correção é calculado somente numa pequena região em torno da vizinhança da fonte de erro. Para corrigir um MDE com diferenças geométricas locais de forma acurada são necessários dois requisitos principais. Primeiro, deve haver um grande número de pontos ou feições correspondentes que representem fielmente as diferenças geométricas locais entre o MDE e a realidade geográfica. Segundo, a função de correção deve descrever e interpolar a correspondência dos pontos com densidade bastante variável sem introduzir deformações não realísticas nas áreas onde não existem pontos de correspondência. A caracterização completa dos erros locais de um MDE pode ser representada por uma superfície contínua, definida

pixel a pixel, contendo o valor da incerteza local em cada célula do MDE. Essa superfície pode ser gerada a partir da interpolação dos RMSE obtidos em várias áreas locais de teste espalhadas no MDE.

#### 2.3.6.3 Erros pontuais

Erros <u>pontuais</u> são caracterizados pelos valores incomuns que estão muito distantes da vizinhança da massa, dos dados, sendo estudada. Em estatística descritiva, esses valores representam observações que se encontram a uma distância anormal dos outros dados em uma amostra aleatória de uma população e costumam ser referidos como valores suspeitos, valores extremos, valores espúrios ou *outliers*. A definição precisa de *outlier* não é muito trivial, mas a caracterização é feita pela sua relação com as demais observações que fazem parte da massa de dados, portanto, seu afastamento em relação a essas observações é muito importante para sua caracterização (MOORE e MCCABE, 1999).

Antes de decidir o que deve ser feito com essas observações destoantes é preciso conhecer as causas do seu aparecimento. Muitas vezes as fontes da sua existência determinam como devem ser tratadas. As principais causas do surgimento de *outliers* são os erros de medição, erros de execução e a própria variabilidade inerente aos elementos da população em estudo.

Independentemente das suas causas o tratamento dos *outliers* pode ser realizado em várias fases (NIST/SEMATECH, 2007). A fase inicial é a da identificação das observações que são potencialmente aberrantes, ou seja, observações que têm fortes possibilidades de virem a ser designadas por *outliers*. A identificação de *outliers* consiste na detecção, com métodos subjetivos, das observações surpreendentes e é feita, geralmente, por análise gráfica ou por parâmetros numéricos indicadores.

A segunda fase tem como objetivo, eliminar a subjetividade associada à fase anterior e constatar se as observações potencialmente identificadas como *outliers* são realmente desse grupo. As observações consideradas preocupantes são submetidas a testes adequados para a situação em estudo. A escolha dos testes aplicados depende de vários

fatores importantes, como o tipo de *outlier* em análise, a quantidade, a origem, o conhecimento da distribuição subjacente à população de origem das observações, etc. Se for aceita a hipótese de algumas observações serem *outliers*, elas podem ser designadas como discordantes. Uma observação diz-se discordante, se for possível considerá-la inconsistente com os valores restantes, depois da aplicação de um critério estatístico objetivo.

Na terceira e última fase, deve ser decidido o que fazer com as observações discordantes. A maneira mais simples de lidar com essas observações é eliminá-las, mas esta abordagem, apesar de muito utilizada, não é aconselhável. Ela só se justifica no caso de os *outliers* serem devidos a erros cuja correção seja inviável. Caso contrário, as observações consideradas como *outliers* devem ser tratadas cuidadosamente, pois contêm informação relevante sobre características subjacentes aos dados e poderão ser decisivas no conhecimento da população a qual pertence a amostra em estudo (ROUSSEEUW et al., 1999).

Para minimizar os efeitos indesejáveis desses diferentes tipos de erros, não caracterizados por dissimilaridade global que ocorrem nos MDEs da área em estudo, foram desenvolvidos tratamentos adequados e flexíveis que são abordados com os detalhes no Capítulo 3.

#### 2.4 Fundamentos básicos para avaliação e correção geométrica de superfícies 3D

Um aspecto considerado importante, em relação ao uso de dados provenientes de sensoriamento remoto para fins de mapeamento de recursos da Terra, é a questão da correção dos erros geométricos, visando à compatibilidade com padrões especificados para as escalas de mapeamento do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) (TIMBÓ ELMIRO, 1994; GAMA, 2007). Esse aspecto é freqüentemente avaliado para atender às restrições de precisão impostas por projetos de mapeamentos sistemáticos que requerem acurácia. Segundo as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (NTCN), definidas no Decreto Lei 89817 de 1984, Capítulo II, que estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para os produtos de mapeamento da classe "A",

90% dos pontos bem definidos em um documento cartográfico, deverão ter um erro planimétrico inferior a 0.5 mm na escala do mapeamento.

O erro altimétrico, segundo o PEC deve ser menor que a metade da equidistância vertical das curvas de níveis definidas para o documento cartográfico. De modo geral, em quaisquer países ou regiões da Terra, são adotados critérios de precisão e exatidão para produtos de mapeamento cartográfico. Assim, os processos de correção geométrica ou de registro a serem aplicados aos dados de sensoriamento remoto para fins cartográficos devem levar em conta estas especificações.

Existem duas formas gerais para a correção dos vários tipos de distorção dos dados de Sensoriamento Remoto 3D com a finalidade de ajustá-los o melhor possível à realidade geográfica do terreno. A primeira baseia-se no conhecimento preciso e na modelagem adequada da natureza e da magnitude das fontes de erros envolvidas no processo de aquisição e usa esses modelos para construir as fórmulas determinísticas de correção. Esta técnica só é eficaz quando toda a geometria e parâmetros do imageamento são muito bem caracterizados. Apresenta a desvantagem de depender de dados precisos da plataforma, do sensor e do ambiente.

A outra forma para correção de erros é baseada no estabelecimento de relações matemáticas de mapeamento entre coordenadas de elementos da imagem (*pixels* ou *voxels*) e as coordenadas cartesianas correspondentes a essas mesmas feições no terreno referenciadas a um sistema cartográfico, por exemplo: UTM. Estas técnicas corrigem a geometria das imagens, trazendo os dados para sua correspondência com a realidade geográfica, sem necessidade do conhecimento da natureza das distorções e de informações da plataforma utilizada na aquisição dos dados. Esta técnica tem se mostrado flexível e de aplicação mais geral, por isso, diversos esforços têm sido empreendidos, com base nesse conceito, para resolver os problemas gerais de correção geométrica, registro, alinhamento, calibração e ajuste de pontos e superfícies tridimensionais (AUDETTE et al., 2000; GRUEN e AKCA, 2005).

Apesar de várias iniciativas relacionadas a avaliações e correções de superfícies identificadas na literatura, ainda existem muitas necessidades de contribuições, principalmente na correção e alinhamento de conjuntos de pontos e superfícies que não

sejam inteiramente rígidos, na maximização da adequação dos modelos matemáticos para a realidade física de situações especificas e nos mecanismos para controle da qualidade interna (POTTMANN et al., 2004). Novas soluções adequadas e satisfatórias ainda precisam ser pesquisadas, desenvolvidas, executadas e testadas, principalmente para aplicações na área de mapeamento topográfico que utilizem dados coletados por novos sensores em regiões de florestas.

## 2.4.1 Técnicas matemáticas gerais para correção de erros em superfícies 3D

A correção de superfícies 3D pode ser colocada como a medida de similaridade entre uma superfície de referência B e a superfície a ser corrigida A. O problema consiste em achar a melhor transformação que associe a cada ponto de A um ponto correspondente de B, minimizando a medida de dissimilaridade entre a superfície transformada  $\hat{A}$  e a superfície padrão B. Assim, a correção ou ajuste, entre dois modelos que representam superfícies tridimensionais A e B, consiste basicamente na estimação de uma função de mapeamento entre os sistemas de coordenadas associados às duas referências como na Equação 2.9

$$x_R = T(x_A) \tag{2.9}$$

onde  $x_A = (x_a, y_a, z_a)$  e  $x_B = (x_b, y_b, z_b)$  são pontos no sistema de coordenadas de A e de B respectivamente, correspondentes à mesma referência física, e onde a qualidade deste mapeamento pode ser quantificada por uma medida global, baseada no ajustamento dos resíduos. Na prática, os dados estão geralmente contaminados por ruídos e distorções, portanto, a melhor relação de mapeamento entre os dois conjuntos seria aquela que conseguisse conciliar o alinhamento de pontos homólogos locais mantendo a melhor consistência global possível.

De forma geral, o problema envolve o tratamento de três questões. Em primeiro lugar, deve ser decidido sobre a escolha das primitivas para o procedimento de correção. A segunda questão está relacionada com o estabelecimento de uma função de transformação para a correção que relacione matematicamente as duas séries de dados sob consideração. Finalmente, uma medida da similaridade deve ser planejada para

assegurar a coincidência das primitivas conjugadas após ter sido aplicada a função apropriada de transformação (HABIB et al., 2004).

A fase mais importante é a representação e formalização da função adequada de transformação. Esta etapa define a formalização das suposições sobre o tipo de relação T entre as duas superfícies que é a mais apropriada para mapear pontos  $x_A$  em  $x_B$  de forma a justapor ou alinhar corretamente as duas séries de dados. Se o contexto da correção for bem comportado, uma transformação rígida é suficientemente adequada para o mapeamento, contanto que as deformações apresentadas pelos objetos da cena sejam insignificantes, comparadas com a exatidão requerida pela transformação (AKCA, 2003; AUDETTE et al., 2000; HABIB et al., 2004).

Por outro lado, se as deformações entre as superfícies forem significativas, especialmente se forem causadas por outros fatores que não sejam apenas o ruído e a distorção do sensor, então uma transformação não rígida deve ser aplicada. As funções de transformações não rígidas podem ainda ser especificadas para fazer ajuste global ou para fazerem ajustes locais atuando em fragmentos. Uma transformação global envolve um único conjunto de equações que ajusta de forma otimizada a totalidade dos dados envolvidos, enquanto as funções de transformação locais utilizam vários conjuntos de equações, dividindo a área de interesse em regiões onde cada uma tem sua própria transformação (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Uma transformação geral de corpo rígido pode ser expressa pela combinação de uma rotação  $R_{AB}$  e de uma translação  $t_{AB}$ , definida por seis parâmetros de acordo com a Equação 2.10.

$$x_B = R_{AB}x_A + t_{AB} \tag{2.10}$$

Assim, dada a correspondência individual dos pontos tridimensionais  $x_{Ai}$  e  $x_{Bi}$ , a correspondência geral de duas superfícies 3D através de transformação de corpo rígido procura tipicamente os valores de R e de t que minimizam a expressão da Equação 2.11.

$$\min_{R,t} \sum_{i=1}^{N} \left\| x_{B_i} - (Rx_{A_i} + t) \right\|^2 \tag{2.11}$$

O problema pode ser reformulado de maneira a separar o cálculo de *t* do de *R*, referenciando as coordenadas aos centróides respectivos de cada conjunto de pontos. A translação será dada pela diferença dos centróides, enquanto para o cálculo da rotação existem várias representações (quaternions, ângulos de Euler, eixo e ângulo, matriz ortogonal, etc.), que podem ser escolhidas em função da maior eficiência ou da melhor estimação numérica dos parâmetros.

A matriz ortogonal, uma das formas mais usadas para cálculo da rotação, consiste em uma matriz 3x3, que pode ser vista como um mapeamento da cena A para a cena B, onde a translação entre suas origens já foi compensada. Cada elemento  $R_{ij}$  da matriz é um coseno de direção, isto é, a projeção de um eixo da cena A em um eixo da cena B (TRUCCO e VERRI, 1998). Neste caso a rotação pode ser expressa pelo produto de três rotações sucessivas ( $\alpha, \beta$  e  $\gamma$ ) em torno dos três eixos x, y e z e representada pela Expressão 2.12.

$$\begin{bmatrix}
\cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\
\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\
-\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma
\end{bmatrix} (2.12)$$

Uma variante da transformação geral de corpo rígido é a transformação 3D global de similaridade, também chamada isogonal definida por sete parâmetros. Conforme o nome sugere, este tipo de transformação preserva a similaridade geométrica, onde os ângulos são mantidos e as distâncias são mudadas com a mesma relação de escala, ou seja, é uma transformação de corpo rígido onde a forma verdadeira é mantida, havendo uma expansão em escala uniforme.

Tal como no caso anterior, esta transformação supõe que os dois sistemas estejam relativamente bem calibrados e não existam erros sistemáticos severos que não tenham sido compensados. A presença dos erros sistemáticos que não podem ser modelados pelas transformações de corpo rígido manifesta-se através de uma qualidade pobre do ajuste entre as séries de dados envolvidas no procedimento de correção.

Se as deformações dos objetos da superfície imageada são significativas e precisam ser consideradas, então uma abordagem de transformação não rígida precisa ser adotada. Os tipos mais simples de transformações não rígidas são generalizações da transformação de corpo rígido descrita anteriormente, onde a formulação geral é dada por uma função polinomial global que mapeia a superfície *A* para a superfície *B*. A generalização da transformação rígida para superfícies 3D é conhecida como transformação *affine* definida por 12 parâmetros, caracterizada pela Equação 2.13

$$x_B = A_{3x3}x_A + b_{3x1} (2.13)$$

onde não há restrição de ortogonalidade nos elementos  $a_{ij}$  da matriz A. Em geral ela não preserva ângulos nem distâncias, mas mantém o paralelismo das linhas.

A formulação mais geral para transformação não rígida é uma função polinomial global, cuja ordem pode variar de 1 a 5, que mapeia a superfície *A* para a *B*. Os métodos globais usam pares homólogos de pontos para gerar uma transformação única e que seja ótima, baseada em um número suficiente de pontos para determinar os parâmetros da transformação. As transformações polinomiais globais somente são adequadas para lidar com distorções de baixa freqüência devido ao seu comportamento imprevisível quando o grau do polinômio é elevado. Geralmente estas funções globais são utilizadas após uma fase de alinhamento inicial do tipo rígido (AUDETTE et al., 2000; CASTELLANI et al., 2002; FUSIELLO et al., 2002). A transformação polinomial global em três dimensões pode ser formulada pelas Equações 2.14, 2.15 e 2.16

$$x_{B} = \sum_{ijk}^{N} a_{ijk} x_{A}^{i} y_{A}^{j} z_{A}^{k}$$
 (2.14)

$$y_B = \sum_{ijk}^{N} b_{ijk} x_A^i y_A^j z_A^k$$
 (2.15)

$$z_{B} = \sum_{ijk}^{N} c_{ijk} x_{A}^{i} y_{A}^{j} z_{A}^{k}$$
 (2.16)

onde  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$  e  $c_{ijk}$  são os coeficientes constantes do polinômio a serem determinados. Como os polinômios são lineares nos seus coeficientes, podemos usar o método dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$ .

As funções globais de mapeamento atendem a um vasto leque de situações, mas nem sempre capturam adequadamente as deformações de algumas feições que são intrinsecamente locais (CACHIER et al., 2003; AUDETTE et al., 2000). As transformações polinomiais por fragmentos são capazes de produzir uma relação mais geral. *Splines* são freqüentemente usadas para representação polinomial por fragmentos.

Funções *splines* são os equivalentes matemáticos das réguas flexíveis utilizadas em desenho técnico. Ajustam-se com exatidão a um pequeno número de pontos de observação e garantem que a junção entre uma parte e outra de uma curva ou superfície seja contínua. Usando *splines* é possível modificar uma parte da curva ou da superfície sem necessidade de recalcular ou mudar todo o conjunto, o que não é possível com funções polinomiais simples. Dependendo do grau dos polinômios as *splines* podem ser lineares, quadráticas ou cúbicas. O termo *spline* bi-cúbica é freqüentemente usado para a situação tridimensional onde superfícies, em vez de linhas precisam ser modeladas. Grande parte das aplicações práticas usa uma classe especial chamada B-*splines* que resultam da soma de outras *splines* com o valor de zero fora do intervalo de interesse. As B-*splines*, são particularmente úteis para suavização e aproximação por mínimos quadrados e permitem ajuste local a partir de polinômios de baixa ordem de forma simples (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Modelos deformáveis seriam os exemplos extremos de funções de transformações para ajuste local de superfícies não rígidas. Esse tipo de transformação consiste em expressar uma superfície em uma imagem 3D como um modelo que se ajusta à forma provável da superfície com dados da imagem de acordo com alguma expressão de base física ou de evolução (TRUCCO e VERRI, 1998). Tais métodos determinam geralmente o movimento da curva ou da superfície, não por combinação explícita, mas pela consideração implícita do movimento da imagem na forma de forças virtuais, que tendem a fazer o modelo concordar com fortes mudanças de gradiente na imagem. A correspondência de regiões nas imagens pode ser feita entre a representação de uma

região e de um modelo já conhecido ou entre a representação de duas regiões distintas. Os modelos deformáveis têm sido muito aplicados em segmentação de imagens (AUDETTE et al., 2000; NIKOLAIDIS e PITAS, 2001). Entretanto, poucas aplicações foram identificadas para correção de deformações de imagens e dados tridimensionais de sensoriamento remoto, na forma de superfícies 2.5D como MDE. Exemplos de utilização de modelos deformáveis no registro de imagens podem ser encontrados em Audette et al., 2000 e Cachier et al., 2003.

### 2.4.2 Simplificações de modelos matemáticos adotadas nesta pesquisa

Na presente pesquisa de tese os dados InSAR 3D foram considerados satisfatoriamente alinhados e justapostos no plano horizontal (eixos X e Y) através de procedimentos de registro realizados em etapas separadas (DUTRA et al., 2002; MOURA, 2005; TIMBÓ ELMIRO et al., 2006, 2007a,b). Esta simplificação dos erros reduz a atuação dos modelos matemáticos abordados e descritos nas Equações 2.9 a 2.16, apenas no eixo vertical. Dessa forma, todo o problema da correção tridimensional se restringe a deslocamentos verticais, onde a transformação e a reamostragem dos modelos é substituída pelo cálculo de uma superfície de correção altimétrica. A superfície de correção tem a mesma resolução dos modelos originais e é somada a eles na base de pixel a pixel. O problema passa, então, a ser de interpolação de amostras com distribuição geográfica irregular para criação de uma grade regular de pontos na resolução desejada. A grade regular é a forma de representação discreta de uma superfície contínua que, dependendo da resolução, da qualidade das amostras e do método de interpolação utilizado, pode caracterizar a superfície contínua sem perdas significativas.

#### 2.4.3 Métodos de interpolação para criação de superfícies contínuas

Conforme estudos de Dutra et al. (2002), Moura (2005) e Timbó Elmiro et al. (2003) os MDEs InSAR usados neste estudo foram submetidos a pré alinhamentos e registros no plano XY considerados satisfatórios reduzindo o problema das correções para interpolação e superfícies. A interpolação é um procedimento para estimar valores de

variáveis nos lugares que não foram amostrados a partir dos locais amostrados. É um procedimento necessário para converter as observações pontuais em campos contínuos, onde o problema fundamental consiste em escolher um modelo de ajuste adequado para que o campo contínuo resultante seja representativo.

Dependendo do fenômeno que está sendo modelado e da distribuição dos pontos de amostragem, certos tipos de interpoladores podem produzir modelos mais representativos da superfície real do que outros. Entretanto, independentemente da escolha do tipo de interpolador, a regra básica é que quanto maior a disponibilidade de amostras e melhor sua distribuição mais representatividade e confiança terão os resultados.

Os métodos de interpolação podem ser divididos em dois grupos principais chamados globais e locais. Interpoladores globais usam os dados disponíveis para prover estimativas de toda a área de interesse, enquanto os interpoladores locais operam sobre pequenas zonas em torno do ponto que está sendo estimado para assegurar que a estimativa seja feita somente a partir da vizinhança imediata e que o ajuste seja o melhor possível. Para melhor situar este tópico e fornecer uma visão compreensiva do tema seguem descrições breves de alguns métodos de interpolação com suas características gerais.

Delimitação de fronteiras – É o método de interpolação mais simples, principalmente para modelagem de dados naturais, consiste em delimitar unidades da paisagem como nos mapas temáticos de solos e de vegetação. Todas as variações importantes ocorrem nas fronteiras das unidades, dentro delas as variações são homogêneas e isotrópicas. Indicam um modelo descontínuo da paisagem e não são muito apropriados para fenômenos de variação gradual.

Polígonos de Thiessen ou de Voronoi - Dado um arranjo bidimensional de amostras, a melhor estimativa do valor de um ponto não visitado é o mesmo valor da amostra mais próxima. Se os dados estão dispostos em uma grade regular, os polígonos são todos iguais, ou seja, quadrados de lados iguais ao espaçamento da grade, se os dados estão dispostos irregularmente resulta uma tesselação irregular. A menos que haja grande quantidade de observações, esse método não é apropriado para fenômenos que variam gradualmente, como é o caso do relevo e de outras variáveis geográficas de

características contínuas. A triangulação de Delaunay constitui o dual da tesselação de Voronoi onde os pontos internos a cada triângulo podem ser interpolados de forma linear ou polinomial, a partir dos vértices da triangulação, produzindo um modelo mais apropriado para expressar a continuidade da variável. A triangulação é vista com mais detalhes no Capítulo 3.

Splines - Funções splines são os equivalentes matemáticos das réguas flexíveis utilizadas em desenho técnico. Ajustam-se com exatidão a um pequeno número de pontos de observação e garantem que a junção entre uma parte e outra de uma curva será contínua. A interpolação por splines é retomada com mais detalhes no Capítulo 3.

Análise de Tendências de Superfície - A forma mais simples de descrever variações graduais de longas distâncias é por meio de modelagem por regressão polinomial. É uma técnica de interpolação de superfície fácil de entender, entretanto por serem interpoladores gerais, são muito suscetíveis a *outliers*. São funções de ajustamento que raramente passam exatamente pelos pontos de observação originais, a menos que haja poucos pontos e a ordem do polinômio seja muito alta.

Médias Deslocadas - Um dos métodos mais utilizados para interpolação do valor de um ponto não visitado é calculando a média das amostras de uma janela da vizinhança local. O tamanho da janela determina a suavização do resultado. No caso de Médias Deslocadas Ponderadas, a contribuição de um ponto de observação para o valor do ponto não visitado deve ser pesada pela distância entre o ponto de observação e o local não visitado. Observações bastante próximas tendem a ser mais similares que aquelas muito afastadas. Assim, a forma mais comum, principalmente para MDE, é a ponderação pelo inverso do quadrado da distância. Detalhes desse método são abordados no Capítulo 3.

Krigagem - A krigagem é um método de interpolação otimizada que utiliza a autocovariância espacial para minimizar alguns problemas que ocorrem nas médias deslocadas. Na krigagem os pesos são escolhidos de forma a fornecer geoestatisticamente o melhor estimador linear não tendencioso. O sucesso da krigagem é fundamentado na teoria das variáveis regionalizadas que considera a variação espacial como a soma de três componentes principais: componente estrutural associada a uma tendência constante, componente aleatória espacialmente correlacionada e uma componente de ruído

aleatório. Se os dados incluem uma tendência bem definida de larga faixa, como a influência climática ou tendência induzida pelo relevo, é recomendável o uso de krigagem universal. Formas de relevo de variação suave podem ser interpoladas com sucesso por meio de krigagem. O método se apóia no reconhecimento de que a variação espacial das propriedades geológicas, hidrológicas ou pedológicas (variáveis regionalizadas) é muito irregular para ser modelado por uma função matemática de suavização, sendo mais bem descrita por uma superfície estatística. Detalhes adicionais desse método são abordados no Capítulo 3.

Na metodologia dessa pesquisa, foram efetivamente usados os seguintes métodos: triangulação seguida de interpolação linear; a interpolação ponderada pelo inverso do quadrado da distância; krigagem; e *splines*, os quais são abordados com mais detalhes no Capítulo 3, em conjunto com a metodologia de desenvolvimento da pesquisa.

# CAPÍTULO 3

# METODOLOGIA E AVALIAÇÕES INICIAIS

A metodologia adotada no trabalho pode ser resumida na seguinte lista de tópicos gerais:

1) aquisição dos dados pelo sistema de imageamento de radar interferométrico; 2) determinação e medição da estrutura de pontos de controle topográficos de campo; 3) avaliação preliminar da qualidade geométrica dos modelos de elevação InSAR; 4) registro e conversão dos dados disponíveis para um sistema geodésico de referência único (WGS-84); 5) identificação e eliminação de valores espúrios nos modelos InSAR banda P e banda X; 6) classificação e seleção dos pontos e áreas de controle de campo adequados para cada fase da correção e avaliação; 7) ajuste e correção altimétrica dos modelos digitais de elevação InSAR através de superfícies de correção geradas por vários métodos de interpolação; 8) avaliação das técnicas de correção e dos modelos corrigidos; 9) extração e análise de informações de alturas e de biomassa da floresta a partir dos MDEs InSAR corrigidos.

A implementação dos tópicos da metodologia foi realizada com auxílio de *Interactive Data Language* (IDL), que é um ambiente computacional interativo de programação. Foram também usados recursos dos softwares MAPINFO, ENVI, MAPGEO, SPRING e Microsoft EXCEL em várias etapas do trabalho.

A idéia central que envolve a metodologia desenvolvida para a correção dos modelos é a transformação dos MDEs InSAR, através da incorporação de superfícies de correção calculadas por diferentes métodos baseados em interpolação de amostras obtidas de pontos de controle. Os MDEs são submetidos a ajustes que transformam suas feições para posições geográficas que representam a maior proximidade possível da realidade espacial da paisagem.

As superfícies de correção são geradas no formato de grades regulares, com a mesma resolução dos modelos InSAR, e adicionadas pixel por pixel aos modelos originais. A eficácia de um determinado método de correção é avaliada através da análise e comparação de parâmetros estatísticos descritivos da dispersão, de tendências e da distribuição dos dados. Os parâmetros de avaliação apresentam propriedades capazes de

certificar a qualidade geométrica local e global das superfícies de correção calculadas e dos modelos corrigidos. As referências cartográficas que compõem a estrutura de controle, utilizada na geração das superfícies de correção e nas avaliações de qualidade, consistem de pontos e áreas de controle de campo, com atributos de coordenadas tridimensionais obtidos por métodos precisos de medição ao longo de estradas, clareiras, pastagens e outras áreas livres de cobertura do solo.

## 3.1 Estrutura geral do método de pesquisa

Para fornecer uma visão global e compreensiva da abordagem do problema tratado, na Figura 3.1 apresenta-se um fluxograma da estrutura geral da metodologia desenvolvida para a pesquisa. Cada tópico do fluxograma, assim como outros detalhes importantes que contribuíram para a viabilização e implementação da metodologia são abordados no decorrer deste Capítulo.

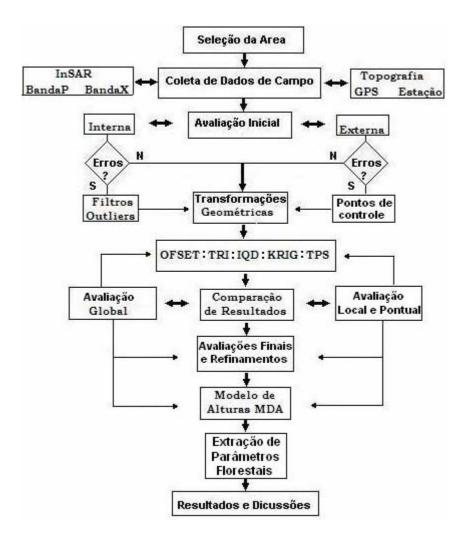


Figura 3.1 – Fluxograma da estrutura geral da metodologia de desenvolvimento da pesquisa.

Nas diferentes etapas do trabalho, a quantificação dos erros e a correção de dados dos modelos de elevação, assim como a verificação da qualidade dos modelos após a realização das correções, foram feitas através da comparação com os dados da estrutura de pontos topográficos de controle de campo. Os pontos de controle de campo selecionados para uso nas diferentes etapas da metodologia foram separados em dois conjuntos distintos. Um grupo de pontos para cálculo das superfícies de correção, os quais passam a ser referidos como amostras de treinamento ou pontos de transformação. Outro grupo de pontos para fazer avaliações da qualidade da correção dos modelos ajustados, os quais passam e ser chamados de amostras de testes ou pontos de verificação. Devido à alta precisão tridimensional absoluta dos métodos topográficos e geodésicos empregados na obtenção dos pontos de controle de campo, da ordem de cinco centímetros (MONICO, 2000; MOURA, 2005), muito superior à necessidade deste trabalho, equivalente a 1/50 da resolução da grade dos MDEs (2.5 m), esses pontos de controle são considerados dados da verdade terrestre isentos de erros.

Os dados de controle topográficos e os modelos digitais de elevação InSAR foram obtidos em épocas diferentes, portanto, foram tomados, em algumas etapas do processo de correção, os cuidados necessários para aproveitar somente os pontos de controle topográficos situados em áreas onde não havia cobertura vegetal no ano de 2000, época da coleta de todos os dados InSAR. Essas etapas de seleção de pontos foram realizadas com auxílio de análises visuais e numéricas das imagens SAR de magnitude em banda X e banda P, imagens ópticas do sistema LANDSAT, imagens da videografia de alta resolução e também usando o suporte de alguns trabalhos de reconhecimento em campo.

#### 3.2 Caracterização da área de estudo

A área de trabalho onde ocorreu a coleta de dados para os ensaios e testes necessários à realização do presente estudo é uma parte da Floresta Nacional de Tapajós na Amazônia, situada ao sul da cidade de Santarém, no baixo curso do Rio Tapajós, às margens da rodovia Cuiabá-Santarém, próxima ao povoado de São Jorge, no Estado do Pará. A

região tem como limites as coordenadas geográficas de 55°00'02"W a 54°53'56"W, em longitude e de 03°11'08"S a 03°03'56"S, em latitude, no sistema geodésico de referência WGS-84. Abrangendo uma área aproximada de 143 km², correspondentes a um terreno retangular de 11.12 x 12.91 km. As altitudes geométricas dentro dos limites da área de estudo variam de um mínimo de 39.13 metros a um máximo de 172.65 metros no sistema WGS-84. A ondulação média do geóide dentro da área de estudo em relação ao elipsóide do sistema WGS-84 é de -17.75 metros, de modo que os valores nominais das altitudes referidas ao nível do mar são, em média, 17.75 metros maiores que os valores das altitudes elipsoidais.

A Figura 3.2 ilustra a localização da área de estudo, mostrando uma visão do geral para o detalhe. O retângulo vermelho indica a área próxima ao Rio Tapajós na composição RGB-543 de imagens TM LANDSAT-5. O retângulo em azul no detalhe inferior corresponde à área geográfica efetivamente explorada na pesquisa e coberta pelos MDEs InSAR utilizados no estudo. A imagem em tons de cinza representa o MDE InSAR em banda P correspondente à área do retângulo azul.

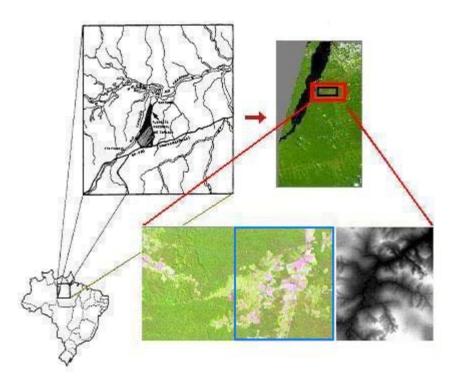


Figura 3.2 - Localização da área de estudo. O retângulo em azul no detalhe da imagem LANDSAT corresponde à área geográfica coberta pelo MDE, em tons de cinza.

## FONTE: adaptada de Moura (2005).

A área de estudo é caracterizada pela ocorrência de floresta primária, regenerações florestais de diferentes estágios de crescimento, pastagens, culturas agrícolas e alguns trechos de solo descoberto. Na região predomina o latossolo amarelo distrófico de baixa fertilidade natural, o qual associado à falta de infra-estrutura conduz a um aproveitamento limitado. Com a derrubada da floresta o solo é utilizado principalmente para a pecuária extensiva e, quando as fontes de nutrientes são exauridas, as áreas são abandonadas e novas florestas derrubadas, provocando modificações de origem antrópica na paisagem que se caracterizam, principalmente, por pastagens e por diversos graus de regeneração nas pastagens abandonadas (MOURA, 2005).

A Figura 3.3 mostra exemplos de paisagens dentro da área de trabalho ilustrando variedades de estruturas florestais existentes. Predomina a vegetação densa característica de florestas de áreas sedimentares. As áreas desmatadas, regenerações mais novas e culturas agrícolas facilitaram os trabalhos de medição dos pontos de controle de campo.



Figura 3.3 – Fotos ilustrando a variedade de estruturas florestais existentes na região de estudo. Áreas de solo exposto facilitaram as medidas do controle de campo.

#### 3.3 Coleta dos dados da pesquisa

Os dados utilizados no trabalho de pesquisa da tese foram coletados na região de estudo em diversas campanhas realizadas em épocas diferentes e utilizando sensores, instrumentos e métodos de coleta diversificados. Com o objetivo de fornecer uma visão

geral e compreensiva dessa etapa do trabalho, é feita a seguir uma breve descrição de algumas características e detalhes dos diferentes tipos de dados utilizados no estudo.

#### 3.3.1 Dados de controle de campo: levantamentos GPS e topográficos

Os pontos topográficos utilizados como estrutura de controle nos processo de correção, calibração e verificação dos dados InSAR foram obtidos em trabalhos de campo realizados nos anos 2000, 2001, 2002, 2003 e 2005. Os métodos geodésicos e topográficos empregados nos levantamentos foram apoiados por estações eletrônicas (estações totais) e rastreamento de sinais de satélites do Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Os pontos determinados pelo método GPS foram coletados por pares de receptores geodésicos de dupla freqüência, operando na modalidade de posicionamento relativo estático, com intervalo de registro de observações de 15 segundos e tempo de coleta de observações de aproximadamente 25 minutos em cada ponto. Para garantir a boa qualidade dos dados no processamento das posições geográficas, os receptores foram sempre instalados em locais afastados de obstáculos que pudessem prejudicar a recepção do sinal, assegurando a menor área de sombra possível para as observações coletadas.

No método utilizado, um dos receptores, denominado base, foi mantido fixo e estacionado no ponto geodésico de latitude: 03°07'59.0272''W, longitude: 54°58'06.3421''S e altitude elipsoidal: 73.648 metros, no sistema geodésico de referência WGS-84. Este ponto está situado na entrada das instalações do 8° Batalhão de Engenharia de Construção (BEC) do Exército Brasileiro, na localidade de São Jorge e serviu de estação de referência para todo o trabalho de medições GPS. O outro receptor, denominado móvel, foi utilizado como itinerante para determinação de coordenadas dos demais pontos de interesse da pesquisa.

A posição do ponto base ficou situada aproximadamente na região central da área de estudo, garantindo um afastamento máximo de sete quilômetros entre a estação fixa e as estações móveis, assegurando a mesma constelação de satélites para os dois receptores em operação. No método empregado, ambos receptores gravaram dados provenientes dos

mesmos satélites, simultaneamente, e as coordenadas precisas de um receptor em relação ao outro puderam ser calculadas pela da técnica de posicionamento relativo com pósprocessamento das observações. Esta técnica de levantamento GPS garante precisão relativa da ordem de um a dois centímetros (MONICO, 2000). Ao final de cada dia de trabalho os dados foram processados e as coordenadas de cada um dos pontos visitados pelo receptor móvel foram calculadas usando como referência as coordenadas do ponto base situado no 8° BEC.

Alguns pontos GPS foram estrategicamente localizados com o objetivo de facilitar as medições subsequentes pelo método de topografia eletrônica utilizando estações totais. Essa estratégia possibilitou a aquisição de maiores quantidades de pontos e o levantamento de áreas mais amplas com menor número de mudanças de posição da estação eletrônica de medição. As estações totais utilizadas nas medições topográficas possuem precisão angular de um segundo de arco (1") e precisão relativa das medidas lineares, a laser, da ordem de uma a duas partes por milhão (1 a 2 ppm).

Os levantamentos topográficos feitos com estação total partiram sempre de dois pontos pré-determinados por observações GPS. Os métodos topográficos utilizados foram a irradiação de pontos para medidas de curtas distâncias associada com a poligonação fechada para cobrir áreas mais extensas. A aplicação desses métodos possibilitou a determinação das coordenadas tridimensionais de várias malhas irregulares de pontos espalhadas ao longo de toda a área coberta pelos MDEs InSAR. Essas condições garantiram precisão final das coordenadas dos pontos levantados em campo da ordem de dois a cinco centímetros. As Figuras 3.4-a e 3.4-b mostram, respectivamente, fotos de seções de coleta de dados utilizando o método GPS e a estação topográfica eletrônica.



Figura 3.4 – Coleta de dados de campo: (a) por meio de GPS e (b) com uso da estação eletrônica realizadas na área de trabalho.

# 3.3.2 Dados do imageamento InSAR

Os modelos digitais de elevação InSAR foram obtidos em setembro de 2000 utilizando o sistema Radar AeS-1 da empresa *Aerosensing Radar Systeme GmbH*. O sistema consiste de dois radares de abertura sintética (SAR) com capacidade de adquirir dados em banda X e banda P. Durante a campanha os vôos foram realizados na FLONA Tapajós e nas suas imediações como parte de um projeto de cooperação entre o INPE e a Diretoria do Serviço Geográfico do Exercito Brasileiro (DSG). Os dados foram coletados para interferometria perpendicular à trajetória em banda P, através de múltiplas passagens, e para interferometria em banda X, através de passagem única, usando a configuração dual de antenas. Foram produzidos os MDEs para os dados das duas bandas obtidas em polarização HH.

O sistema AeS-1 produz imageamento de polarização completa da banda P onde os dados são obtidos no comprimento de onda (λ) de 72 cm, correspondente à freqüência de 415 MHz, com largura de banda de 70 MHz e ângulo de depressão de 45°. Na banda X a polarização é do tipo HH e os dados são obtidos na freqüência média de 9.6 GHz, com largura de banda de 400 MHz. A altitude média de vôo foi de 3216 m. As cenas da banda

P apresentam pixels com resolução em range de 1.5 metros e resolução em azimute de 0.7 metros. As imagens da banda X têm pixels com resolução em *ground range* de até 0.5 metros (HOFMANN et al., 1999; DUTRA et al., 2002). Todos os dados foram reamostrados para uma resolução comum de 2.5 metros.

Nas campanhas típicas, os dados adquiridos pelo sistema AeS-1 cobrem centenas de km² de área e são processados para gerar modelos digitais de elevação georretificados e imagens de magnitude SAR radiometricamente corrigidas. Posteriormente os dados podem ser pós-processados para gerar outros produtos de valor agregado como mapas de curvas de níveis, mapas topográficos e até modelos digitais de cidades (MOREIRA, 1996). A Figura 3.5 mostra uma visão geral do sistema InSAR AeS-1. Na Figura 3.5-a podem ser vistas as duas antenas laterais para interferometria de passagem única em banda X instaladas na fuselagem da aeronave e na Figura 3.5-b é mostrado um detalhe dos equipamentos.



Figura 3.5 – Visão geral do Sistema de imageamento InSAR AeS-1. Na foto (a) pode ser vista a configuração dual de antenas para passagem única em banda X. FONTE: adaptada de Moreira (1996).

Segundo Moreira (1996), no sistema AeS-1 os processamentos SAR e InSAR são feitos a partir da leitura dos dados brutos gravados pelo sistema usando um arranjo de processadores interconectados por uma rede de alta velocidade. Podem ser gerados automaticamente pelo sistema os seguintes produtos: 1) modelo digital de elevação do terreno geocodificado (MDE); 2) imagens de magnitude SAR geocodificadas e radiometricamente calibradas; e 3) mapa de coerência geocodificado. O sistema conta

com uma estação GPS de terra que é constituída por um receptor de sinais do sistema GPS de dupla freqüência de alta qualidade e uma ligação de dados via rádio para o avião que está equipado com outro receptor GPS, permitindo o traçado da trajetória do vôo no modo GPS diferencial (DGPS) cinemático em tempo real.

Os dados GPS recebidos são também gravados para posterior processamento DGPS com uma precisão mais acurada para uso no processamento dos dados interferométricos. Para conseguir grande exatidão da altitude do MDE InSAR é necessário obter uma solução GPS diferencial fixa através de pós-processamento usando a estação GPS de terra como base. Deve ser mantida também uma distância máxima entre a aeronave e a estação GPS de terra para garantir a precisão satisfatória. O sistema de controle de vôo é baseado no sistema DGPS cinemático processado em tempo real acoplado ao sistema inercial de navegação (INS). Maiores detalhes da configuração e operação do sistema AeS-1 podem ser obtidos em Gama (2007); Holecz et al. (1997); Hofmann et al. (1999) e Moreira (1996).

A Figura 3.6 apresenta exemplos dos produtos da banda X, em polarização HH, gerados pelo sistema de mapeamento AeS-1 adquiridos na Floresta Nacional de Tapajós. A imagem SAR de amplitude foi recortada para os limites da área de estudo e é ilustrada na Figura 3.6-a e o modelo digital de elevação, correspondente à mesma área, é mostrado na Figura 3.6-b. A Figura 3.7 ilustra exemplos similares aos da Figura 3.6 com os dados relativos à banda P.

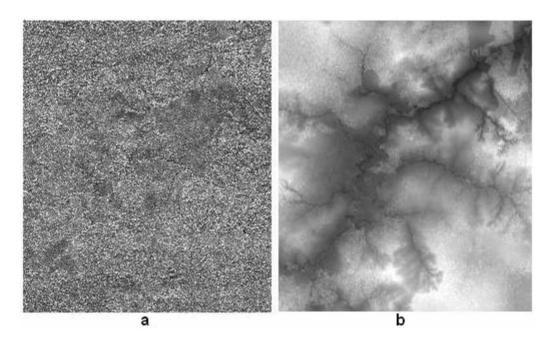


Figura 3.6 – Produtos banda X, em polarização HH, gerados pelo Sistema de imageamento InSAR AeS-1. (a) Imagem de amplitude e (b) MDE.

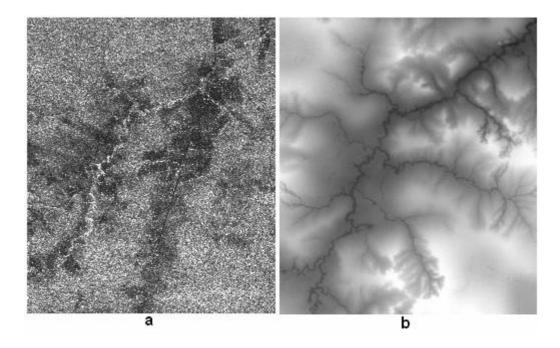


Figura 3.7 – Produtos banda P, em polarização HH, gerados pelo Sistema de imageamento InSAR AeS-1. (a) Imagem de amplitude e (b) MDE.

Os dados InSAR em banda P e banda X foram adquiridos no ano de 2000 e os trabalhos de campo foram realizados nos anos de 2001, 2002, 2003 e 2005. Devido à dinâmica da paisagem da região, ocorreram mudanças significativas na cobertura vegetal da área de

trabalho nos intervalos entre essas diferentes épocas de coleta de dados. Por exemplo, áreas limpas utilizadas para medição de pontos de controle em 2005 podem ter sido mapeadas como florestas pelo sistema InSAR em 2000. Isso exigiu cuidados especiais na seleção de pontos de controle para diferentes fases do trabalho. A Figura 3.8-a mostra uma imagem do sensor TM-LANDSAT-5 do ano 2000 e a Figura 3.8-b ilustra outra imagem do mesmo sensor obtida no ano 2005. As imagens fornecem uma medida aproximada dessa dinâmica intensa da paisagem local. Várias mudanças da cobertura do solo podem ser observadas nestas imagens multitemporais.

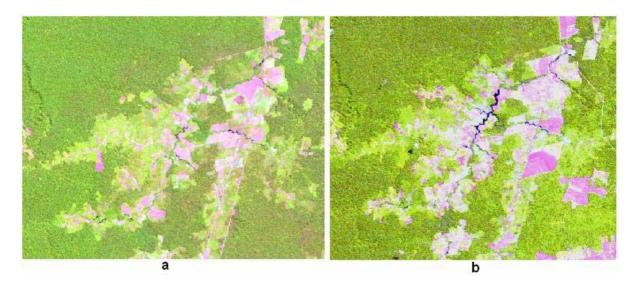


Figura 3.8 – Imagens TM-LANDSAT: (a) de 2000 e (b) de 2005 ilustrando a dinâmica da paisagem da área de estudo.

Durante a aquisição dos dados de imageamento radar no ano 2000, foram realizadas coletas de dados complementares de campo como fotos, coordenadas, localizações, descrição da cobertura vegetal e reconhecimentos de campo. Estes dados serviram como informações auxiliares em algumas etapas da metodologia de pesquisa.

## 3.4 Avaliações preliminares e requisitos de tratamentos dos MDEs InSAR

Investigações iniciais de caráter preliminar foram realizadas para verificar a qualidade geral dos MDEs produzidos pelo método InSAR na Floresta Nacional de Tapajós determinando, de modo aproximado, a natureza e extensão de erros existentes. Esta etapa visou basicamente três objetivos: 1) identificar a presença de valores espúrios nos MDEs,

2) obter indicadores aproximados da qualidade geométrica dos modelos e, 3) constatar a necessidade de aplicação de tratamentos nos modelos de elevação e estabelecer requisitos e procedimentos para essa implementação.

Com base na teoria científica de suporte aos métodos e técnicas de mapeamento aplicadas nesse estudo, espera-se que os dados dos MDEs, da banda P e da banda X, coletados e processados adequadamente, possam produzir resultados de altitudes muito próximos dos valores obtidos através dos levantamentos topográficos de campo realizados em áreas desprovidas de cobertura florestal (estradas, campos arados e pastagens). Essa situação esperada, embora fundamentada nos princípios físicos e bases teóricas do sensoriamento remoto por radar e nas propriedades e características de operação dos demais instrumentos e métodos usados para coleta dos dados de campo, não se concretizou na prática. Isso ocorreu devido aos erros introduzidos durante as fases de aquisição e processamento dos dados inerentes a esta tecnologia de geração do MDE. Segundo Holmes et al. (2000) os processos responsáveis pela incorporação de todos os erros em um MDE proveniente de dados de sensoriamento remoto, tal como ocorre em muitos outros processos geográficos ou ambientais, ainda não são suficientemente bem compreendidos de forma a permitir uma análise inteiramente determinística, absoluta e precisa das causas e efeitos.

Os modelos usados como base para aplicação das diferentes correções deste trabalho de pesquisa de tese foram os originais gerados pelo sistema AeS-1 acrescidos de um *offset* vertical de -13.11 metros realizado por Dutra et al. (2002) e recortados para uma área geográfica de interesse. O primeiro passo da investigação realizada nos MDEs tratou de uma análise da consistência interna dos dados de elevação a fim de identificar a existência de valores espúrios que pudessem ser muito destoantes dos seus vizinhos. Tais valores são freqüentemente referidos na literatura como *outliers* e necessitaram de tratamentos por métodos de filtragens adaptativas para serem removidos antes que os dados dos MDEs fossem submetidos a outros tratamentos. Este tipo de investigação e tratamento não requereu referências externas para controle do processo, razão pela qual foi chamada de avaliação interna.

#### 3.4.1 Avaliação da consistência interna dos MDEs: tratamento de outliers

De um modo geral dois aspectos básicos são essenciais para caracterizar qualquer conjunto de dados. O primeiro é um exame da forma como esses dados são representados graficamente, a fim de detectar características importantes para estabelecer suposições acerca das variações e escolhas de métodos e parâmetros para se obter as melhores inferências possíveis da população em estudo. O outro aspecto é um exame detalhado dos dados para identificar as observações incomuns que estão muito distantes da massa dos dados, freqüentemente chamados valores suspeitos ou *outliers*.

Um *outlier* é uma observação que se encontra a uma distância anormal dos outros valores em uma amostra aleatória de uma população. Essa definição pode sugerir que seja deixada por conta do analista ou de algum processo de consenso a decisão do que seja considerado anormal. Por isso, antes que as observações anormais possam ser escolhidas é necessário caracterizar as observações normais e basear os critérios nessas características. Um *outlier* é caracterizado pela sua relação com as demais observações que fazem parte da amostra. O seu distanciamento em relação a essas observações é fundamental para se fazer a sua caracterização.

Nos MDEs InSAR de Tapajós, os *outliers* referem-se a pontos cujos valores de altitudes são muito diferentes dos valores das altitudes dos seus vizinhos, ultrapassando um certo limiar. É importante ressaltar que o tipo de tratamento para esses dados não se resume apenas na aplicação de filtros genericamente utilizados para remoção de ruídos, como os filtros de média, filtros não lineares de mediana e de moda ou filtros morfológicos, muito utilizados para tratamento de ruídos em imagens de sensoriamento remoto. Estes filtros atuam sobre toda a grade do modelo podendo remover ou modificar pequenas variações que geralmente representam feições importantes do MDE, causando problemas maiores do que aqueles que se pretende corrigir. Os filtros desenvolvidos para o tratamento interno dos MDEs preservaram as variações importantes dos dados espaciais e atuaram localmente e seletivamente na vizinhança dos valores problemáticos. Três tipos de procedimentos foram desenvolvidos para tratamento de *outliers* nos MDEs de Tapajós e os detalhes principais de cada um são abordados nos tópicos a seguir.

#### 3.4.1.1 Critério de Chauvenet no tratamento de outliers

Erros em medições e modelos estatísticos sob a forma de resíduos podem, em geral, ser caracterizados por uma distribuição de forma normal. Tendo-se *n* medições de uma grandeza que seguem uma distribuição Gaussiana, esta distribuição fornece a probabilidade de que um dado valor medido esteja desviado de um certo valor da média esperada. Não se pode esperar probabilidade menor que 1/*n*, portanto, se a probabilidade para o desvio de um certo valor medido é menor que 1/*n*, o valor pode ser qualificado para ser eliminado do conjunto de dados. Na prática são aplicados testes mais restritivos para eliminação de valores medidos. O critério de Chauvenet fornece uma base consistente para a tomada de decisão de excluir ou não um dado suspeito de um conjunto de valores medidos, especifica que um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade de obter o desvio em relação à média é menor que 1/2*n* (MOORE e MCCABE, 1999).

Para aplicação do critério de Chauvenet é necessário, em primeiro lugar, calcular a média e o desvio padrão da amostra, representada por uma janela do MDE de tamanho 3x3, 5x5, 7x7 ou maior. Com base em quanto o dado suspeito difere da média, usa-se a função de distribuição normal para determinar a probabilidade de que um determinado ponto da amostra assuma o valor do ponto, de dados, suspeito. Multiplica-se esta probabilidade pelo número de pontos da amostra tomados. Se o resultado for menor que 0.5, o ponto suspeito pode ser considerado um outlier. Ou seja, uma leitura pode ser rejeitada, se a probabilidade de obter um desvio padrão particular da média for inferior a 1/2n, onde n é o total de pontos da amostra, representado por uma janela do MDE de tamanho 3x3, 5x5, 7x7 ou maior. A Figura 3.9 ilustra o diagrama de blocos com os tópicos gerais do núcleo do algoritmo para aplicação do critério de Chauvenet nos dados dos MDEs da área de estudo. No diagrama, "V" representa o valor de elevação lido do MDE que será percorrido pixel por pixel, "P(V)" é a probabilidade de "V" pertencer ao conjunto de dados da janela escolhida, "P(LIM)" a probabilidade limite definida no critério de Chauvenet, "F" o valor que será atribuído ao MDE filtrado e "Trata V" representa o processo de tratamento dado ao valor suspeito lido do MDE, considerado outlier. A janela é representada por uma área do MDE, em pixels, de tamanho 3x3, 5x5, 7x7 ou maior.

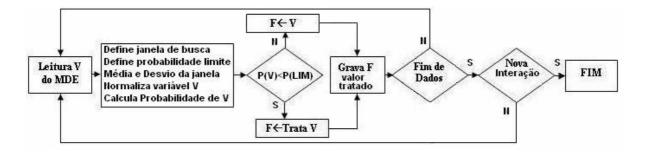


Figura 3.9 – Diagrama de blocos com os passos gerais do procedimento para tratamento de *outliers* usando o critério de Chauvenet.

A Figura 3.12-a mostra um exemplo da distribuição geográfica de *outliers*, na cor vermelha, identificados no MDE da banda P por meio do critério de Chauvenet.

## 3.4.1.2 Tratamento de *outliers* pelo método do *Boxplot*

Neste estudo, devido às características das amostras usadas, foi assumida, na maioria das vezes, a normalidade dos dados. Porém, para fins de muitas modelagens estatísticas, os dados não requerem necessariamente uma distribuição de forma normal ou simétrica, em forma de sino. Pode-se, então, usar procedimentos úteis capazes de identificar facilmente valores extremos em relação ao resto dos dados e que não façam pressupostos do tipo de distribuição nem requeiram qualquer estimativa prévia de uma média ou desvio padrão. Para este objetivo foi utilizada no trabalho a variação de uma técnica de estatística descritiva que pode ser empregada na identificação de *outliers* chamada gráfico de quadro ou *boxplot*, que é capaz de mostrar visualmente diferentes tipos de populações, sem fazer quaisquer hipóteses sobre a distribuição estatística dos dados.

Este método consiste de um tipo de apresentação utilizada para descrever o comportamento dos dados tanto no meio como nos extremos das distribuições. É uma forma simples de representar grupos de dados numéricos através dos seus cinco números resumos: mínimo, quartil inferior (Q1), mediana, quartil superior (Q2), e máximo. Os quartis inferiores e superiores são definidos como sendo o 25° e o 75° percentis (ROUSSEEUW et al., 1999).

Se Q1 é o quartil inferior e Q2 é o quartil superior, então a diferença (Q2 - Q1) é chamada intervalo interquartil ou IQ. O *boxplot* é construído traçando um quadro entre

os quartis superior e inferior com uma linha contínua desenhada através do quadro para localizar a mediana. As seguintes quantidades, denominadas cercas, são usadas para identificar valores extremos nas caudas da distribuição:

1) cerca interna inferior: Q1 - 1.5\*IQ

2) cerca interna superior: Q2 + 1.5\*IQ

3) cerca externa inferior: Q1 - 3\*IQ

4) cerca externa superior: Q2 + 3\*IQ.

Um ponto além de uma cerca interna em um ou outro lado é considerado um *outlier* suave. Um ponto além de uma cerca externa é considerado um *outlier* extremo (NIST/SEMATECH, 2007). Os MDEs de Tapajós foram filtrados com o uso desse critério usando uma janela na vizinhança dos valores suspeitos. Os valores da vizinhança considerados *outliers* foram substituídos pelo valor da mediana local. Um diagrama de blocos simplificado com os passos gerais do núcleo do algoritmo para aplicação do método do *boxplot* é mostrado na Figura 3.10, que fornece uma visão geral da lógica do procedimento. Os símbolos e variáveis do diagrama possuem significados idênticos aos usados na Figura 3.9. A janela é representada por uma área do MDE, em pixels, de tamanho 3x3, 5x5, 7x7 ou maior.

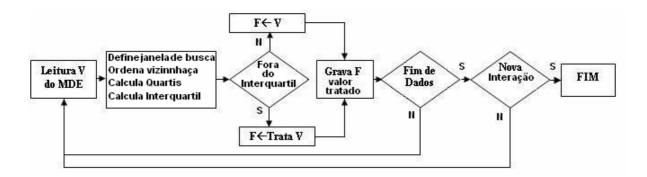


Figura 3.10 – Diagrama de blocos com os passos gerais do algoritmo para tratamento de *outliers* pelo método do *boxplot*.

A Figura 3.12-b mostra, na cor rosa, um exemplo da distribuição geográfica de *outliers* identificados através do método do *boxplot* no MDE da banda P da FLONA Tapajós.

## 3.4.1.3 Tratamento de outliers com base na proximidade e declividade

Critérios empíricos baseados em algum conhecimento prévio e no julgamento crítico do comportamento dos dados podem trazer bons resultados para tratar dados de MDE. Muitas vezes o analista não deve simplesmente aplicar a estatística de maneira automática, mas deve preferencialmente combinar o julgamento profissional com a análise estatística. Segundo Miller (2004), a primeira lei de Tobler da geografia estabelece que tudo no espaço geográfico está relacionado a tudo mais que está em volta, porém as feições geograficamente mais próximas possuem um relacionamento muito mais estreito do que as mais distantes. Este conceito está embutido na maioria das modelagens de processos espaciais e ambientais (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Portanto, nas estratégias implementadas para tratamento interno de dados espúrios de MDE pode ser adequado levar em consideração essa lógica de proximidade muito aceita na análise de dados geográficos. Assim, foi adotada uma estratégia para tratamento de *outliers* embutindo este conceito. A base do procedimento foi o conhecimento do comportamento do relevo natural, onde é pouco comum encontrar declividades do terreno superiores a 100%, ou seja, declividades de vertentes com valores absolutos acima de 45 graus. A dedução pode ser considerada particularmente verdadeira no trecho da Amazônia em estudo, onde as visitas de campo e as análises de documentos cartográficos disponíveis da região indicaram essa situação. No MDE, formado por uma grade de pixels discretos, a tangente da declividade em qualquer direção pode ser obtida, de forma aproximada, dividindo-se a diferença de altura entre dois pixels vizinhos pela resolução espacial da grade (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). A tangente da declividade (Tg(D)), o ângulo de declividade (D), e a declividade percentual (D%) podem ser expressos, respectivamente, pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$Tg(D) = Desnível/DistânciaPlana$$
 (3.1)

$$D=ArcTg(Desnível/DistânciaPlana)$$
 (3.2)

$$D\%$$
=(Desnível/DistânciaPlana)x100 (3.3)

Assim, uma diferença de altura (Desnível) entre dois pixels vizinhos de valor próximo da resolução horizontal da grade (Distância Plana) corresponde a uma rampa com declividade angular aproximada de 45 graus ou 100%. Quando a diferença de altura é maior que a resolução horizontal da grade, a declividade ultrapassa os 100%. Pode-se, então, supor que se um pixel difere da média dos seus vizinhos em um valor muito acima da resolução horizontal da grade do MDE, ele pode ser considerado um forte candidato a *outlier*. Assim, a resolução horizontal da grade é um bom valor empírico de limiar de decisão para classificar ou não uma observação como *outlier*. A Figura 3.11 mostra um diagrama de blocos contendo passos gerais do algoritmo para essa etapa do estudo. A janela é representada por uma área do MDE, em pixels, de tamanho 3x3, 5x5, 7x7 ou maior. O limiar de decisão é 2,5 metros, baseado na dimensão da grade do MDE. Alguns símbolos e variáveis do diagrama já foram definidos com os significados idênticos aos usados na Figura 3.9.

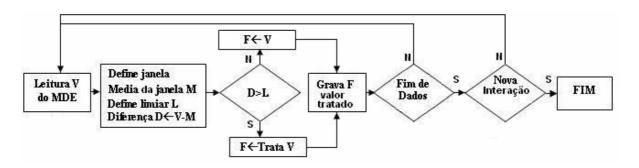


Figura 3.11 – Diagrama de blocos com os passos gerais do algoritmo para o tratamento de *outliers* pelo método da proximidade e declividade.

A Figura 3.12-c mostra um exemplo da distribuição geográfica dos *outliers*, na cor vermelha, identificados no MDE da banda P com base no processo da proximidade e declividade descrito.

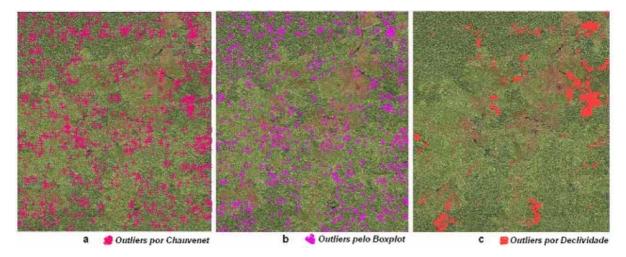


Figura 3.12 – Distribuição geográfica de *outliers* identificados e removidos por três processos: (a) Chauvenet, (b) *boxplot* e (c) proximidade e declividade.

Para os três métodos discutidos os tratamentos de *outliers* foram implementados através de filtros de convolução que adotam um limiar de decisão. Os algoritmos para filtragem classificaram os pontos como *outliers* baseados nas medidas de descontinuidades adotadas, considerando suposições acerca da estrutura dos pontos do terreno na vizinhança local. No critério da proximidade e declividade, por exemplo, se o valor absoluto da declividade ou da diferença de altura é superior ao limiar de decisão, então o ponto em questão deve pertencer a um objeto ou deve ser um *outlier*. A suposição é baseada na lógica de que as declividades mais íngremes da paisagem pertencem aos objetos e, se ocorrem declividades extremas em todos os lados da vizinhança do ponto, ele é um *outlier* isolado.

Os filtros podem tratar os pontos suspeitos em uma única interação ou recursivamente em várias iterações (SITHOLE e VOSSELMAN, 2004). Nos três procedimentos implementados foi observado que a maioria de *outliers* é tratada na primeira interação do filtro. Locais distantes das áreas de ocorrências de *outliers* não sofrem modificações nas interações subseqüentes do filtro, se forem mantidas as mesmas condições. Entretanto, devido ao tratamento na vizinhança de algumas áreas de ocorrências de *outliers*, ainda podem restar pontos que serão detectados pelo critério do filtro e tratados em interações subseqüentes. Após algumas interações todos os *outliers* são removidos ou, então, a quantidade que resta é insignificante. O recurso de múltiplas interações do filtro pode, em alguns casos, tratar *outliers* de padrão linear ou em formato de pequenas áreas.

Para melhorar a eficiência da filtragem do MDE no tratamento de *outliers* diversos parâmetros foram variados: o processamento de filtragem aplicado várias vezes; a janela de processamento foi aumentada progressivamente a fim de abranger uma vizinhança de pesquisa maior; a medida de descontinuidade ou limiar de decisão foi interativamente variada em função da rugosidade do terreno, da cobertura do solo e da banda (P ou X) filtrada. Alguns ensaios com os algoritmos foram feitos em conjunto com a variação desses parâmetros. Devido a mudanças de parâmetros, os resultados produzidos também se mostraram um pouco diferentes, porém observou-se que os *outliers* mais significativos foram facilmente identificados em todos os métodos testados. Devido aos diferentes resultados decorrentes da variação dos parâmetros discutidos, foi adotada, para o tratamento final dos dados, uma composição dos três métodos abordados, através da aplicação seqüencial de cada um sobre os MDEs.

De qualquer forma, os ensaios mostraram que os *outliers* identificados por qualquer combinação de alternativas não apresentaram muitas coincidências de posição geográfica com os pontos selecionados da estrutura de controle usados para treinamentos ou para testes das superfícies de correção. Muitos *outliers* foram identificados em regiões cobertas por florestas. Assim, a aplicação de um ou outro método não interferiu na fase seguinte do trabalho e os algoritmos de remoção de *outliers* puderam ser indistintamente empregados antes ou depois da aplicação da correção altimérica feita pelos métodos de interpolação de superfícies.

As técnicas foram desenvolvidas para tratar essencialmente feições pontuais, mas pela composição de mais de um método, pelo aumento da janela de vizinhança, pela interação de múltiplas interações e pela combinação de algumas dessas hipóteses trataram também feições na forma de linhas e de pequenas áreas. Não foram exploradas estratégias voltadas para tratamentos de feições com formas complexas ou derivadas de padrões sistemáticos existentes nos modelos. Esses temas são assunto de interesse do autor para exploração em futuros estudos.

#### 3.4.2 Consistência externa dos MDEs e verificação da necessidade de ajustes

Completado o tratamento dos problemas de consistência interna por meio da filtragem de *outliers*, o próximo passo da avaliação preliminar dos MDEs tratou da consistência externa dos dados, ou seja, da verificação do comportamento dos modelos em relação à realidade geográfica do terreno, investigando se as posições das feições mapeadas no MDE correspondem às posições de suas homólogas no terreno real. Neste caso, houve necessidade de comparação com referências externas aos modelos de elevação constituídas pelos pontos de controle de campo.

Procedimentos de registro e verificação de alinhamento dos dados InSAR foram feitos pela comparação destes dados com imagens do espectro ótico provenientes do sistema LANDSAT e do sistema de videografia de alta resolução. O apoio de informações provenientes de mapas topográficos, dados de perfilamento laser, dados da missão SRTM, também foram empregados no georeferenciamento e ajuste de dados. Estes cuidados garantiram um registro horizontal bastante satisfatório aos MDEs em estudo, restringindo os erros a serem corrigidos somente na componente vertical (altitudes). Detalhes dos procedimentos utilizados nessas etapas são reportadas em Dutra et al. (2002) e Timbó Elmiro et al. (2006).

A existência de refletores de cantos instalados no solo com a medição de coordenadas precisas, através de sinais GPS, usadas no processamento e geocodificação dos MDEs originais, também contribuíram para a garantia de um bom registro dos dados no plano horizontal. Em resumo, as avaliações e procedimentos iniciais de verificação nos MDEs confirmaram a existência de bom alinhamento horizontal dos dados, porém revelaram a existência de erros verticais. Confirmaram a hipótese da necessidade de calibração dos dados em altitude através de métodos mais aprimorados. A calibração dos MDEs somente em altitudes implicou simplificação da teoria matemática de correção geométrica e registro de dados tridimensionais apresentada no Capítulo 2. O problema ficou reduzido à aplicação de adaptações de métodos de interpolação adequados nos dados altimétricos resultantes das amostras de campo e dos MDEs InSAR. Métodos de calibração simultânea nos três eixos do sistema de coordenadas do MDE podem representar uma solução mais consistente, sendo assunto de interesse de pesquisa do autor para ser explorado em futuros trabalhos.

## 3.4.2.1 Análise de tendências direcionais globais de inclinação dos MDEs

Visando constatar a necessidade de aplicação de tratamentos geométricos adicionais nos modelos de elevação, foi realizada uma análise com a finalidade de testar a ocorrência de tendências globais de inclinação nos modelos em torno dos eixos coordenados X e Y. O teste de avaliação foi aplicado para ambos os MDEs da banda X e da Banda P. Trinta agrupamentos locais de pontos extraídos da estrutura de controle topográfica foram selecionados para este teste, com cada agrupamento formado por cerca de 20 amostras pontuais. A seleção dos agrupamentos seguiu o critério da sua melhor distribuição geográfica na área de estudo. Para cada agrupamento local de pontos, foi determinado o valor médio do erro altimétrico calculado pela média aritmética das diferenças entre o valor de campo e o valor correspondente no MDE. Estes erros, por sua vez, foram ajustados por meio de uma superfície de regressão linear cujo modelo é dado pela Equação 3.4.

$$Z = b_0 + b_1 X + b_2 Y (3.4)$$

onde Z representa os erros altimétricos médios, X e Y representam as coordenadas planas cartesianas (E e N no sistema UTM),  $b_0$  é a altura ajustada do plano de erros na origem dos eixos do MDE,  $b_1$  indica a variação por incremento de X, quando Y é mantido constante e  $b_2$  indica a variação por incremento de Y, quando X se mantém constante. A função de regressão ajustada resultou na Equação 3.5 para o MDE da banda Y e na Equação 3.6 para o MDE da banda Y

$$Z = 0.74 + 0.000051X + 0.00032Y \tag{3.5}$$

$$Z = 0.52 + 0.000033X + 0.00028Y \tag{3.6}$$

Para testar se os erros têm alguma relação com as posições X e Y foi utilizado o teste estatitico F = MSR/MSE, com nível de significância  $\alpha = 0.05$ . O termo MSR (Mean Sqared Regression) refere-se à soma dos quadrados dos desvios dos valores ajustados na regressão em relação à média dos dados e MSE (Mean Squared Error) refere-se ao valor médio da soma dos quadrados dos resíduos da regressão. Os três parâmetros da regressão foram estimados, portanto são 30 - 3 = 27 graus de liberdade associados ao MSE e 2

graus de liberdade, correspondentes aos eixos X e Y, asociados ao MSR. As hipóteses são:

- 1) Se F  $\leq$  F(0.95;2,27), então  $b_1 = b_2 = 0$
- 2) Se F > F(0.95;2,27), então nem todos coeficientes  $b_1$  e  $b_2$  = 0.

Como MSR/MSE resultou em 2.98, então  $F \le (F(0.95;2,27) = 3.36)$ , concluindo-se pela hipótese 1, onde  $b_1 = b_2 = 0$ . Portanto, não há relação de tendência entre os erros e as coordenadas E, N do MDE. O cálculo do coeficiente múltiplo de determinação ( $R^2$ ) da superfície de regressão também resultou nulo. Os erros apresentam um comportamento de picos e vales sem mostrar tendências sistemáticas.

A Figura 3.13 mostra a distribuição geográfica dos erros médios dos agrupamentos de pontos considerados no teste de avaliação. Na Figura 3.13-a são mostrados os erros na banda P e na Figura 3.13-b os erros na banda X. As áreas dos símbolos são proporcionais às magnitudes dos erros médios encontrados. A cor vermelha representa os valores positivos e a cor azul representa os valores negativos para os erros encontrados.

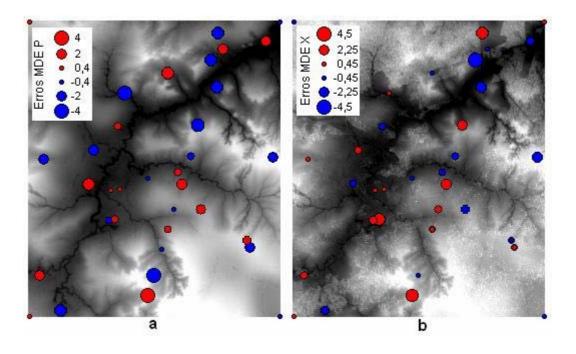


Figura 3.13 – Erros em grupos de pontos distribuídos geograficamente nos MDEs, mostrando sucessões de picos e vales característicos de erros locais de tamanhos variáveis (a) banda P e (b) banda X.

A análise da Figura 3.13 complementa a interpretação dos resultados da superfície de regressão indicando a não existência de tendências sistemáticas globais de inclinação nos modelos em qualquer direção. Se houvesse tendências de inclinação sistemática global, as correções poderiam ser feitas de forma simples por meio da aplicação de rotações nos modelos em torno dos eixos coordenados. Os dados deste teste de avaliação indicam a ocorrência de uma sucessão de picos e vales característicos de erros tipicamente locais de tamanhos variáveis.

A existência desses erros não sistemáticos foi reforçada pela observação de alguns resíduos elevados em pontos individuais dos agrupamentos locais de pontos. A hipótese da presença dos erros foi também indicada pela observação de perfis extraídos dos MDEs apresentando algumas descontinuidades em locais de características tipicamente contínuas, tais como estradas principais e pátios planos de sedes de sítios e instituições. Estes locais são resultantes da intervenção humana na paisagem e possuem perfis tipicamente regulares, comprovados por reconhecimento de campo.

As degradações existentes nos MDEs são devidas a problemas inerentes ao próprio método de imageamento InSAR aerotransportado. No Capítulo 2 foi apresentado um conjunto de fatores relacionados ao terreno, decorrentes da fase de coleta de dados e provenientes do processamento InSAR que podem ter contribuído de forma individual ou conjunta para a existência dos erros. O problema pode, ainda, ter sido agravado por fatores aparentemente pouco significativos como os movimentos, projeções e sombras das árvores no terreno associadas à geometria da visada lateral do radar, à mosaicagem de dados tomados de faixas individuais em diferentes posições, etc.

Algumas falhas, posteriormente comprovadas, no sistema inercial de navegação da aeronave durante os vôos da FLONA Tapajós podem também ter contribuído para o aumento das degradações. Essas falhas comprometeram tanto o posicionamento relativo quanto o posicionamento absoluto, ou seja, provocaram erros entre as partes internas do modelo e erros em relação ao terreno. Os problemas puderam ser claramente percebidos

ao comparar os modelos de elevação gerados pelas bandas P e X, onde alvos como estradas, áreas de solo exposto e construções, que deveriam teoricamente apresentar a mesma altitude, apresentam diferenças positivas em algumas áreas e diferenças negativas em outras (DUTRA et al., 2002; MOURA, 2005). Esses erros podem se manifestar na forma de torções, encurvamentos, compressões, estiramentos ou pela da incorporação de feições espúrias introduzidas de modo artificial ou tendencioso, podendo causar deformações locais mais severas na cena imageada.

Essas avaliações preliminares revelaram a presença de erros e reforçaram a hipótese da necessidade de correção dos dados dos MDEs por meio de métodos adaptativos capazes de corrigir deslocamentos rígidos e não rígidos introduzidos pelos múltiplos fatores que participam do processo de formação do MDE (HEUVELINK, 1998). Os métodos adaptativos de correção propostos têm como principal objetivo garantir a máxima correspondência dos dados provenientes da técnica InSAR com a realidade da paisagem geográfica, ou seja, visam aumentar o potencial de aplicações gerais desses modelos de elevação da banda P e da banda X para geração de outros produtos e análises derivadas de MDE.

#### 3.5 – Métodos de correção dos MDEs da área de estudo

Após o tratamento dos *outliers*, realizada a comprovação da existência de erros de natureza geométrica nos modelos InSAR e reforçada a indicação da necessidade de corrigir os erros de forma adaptativa e flexibilizada, os procedimentos e estratégias de correção dos modelos InSAR foram, então, efetivamente desenvolvidos e os detalhes dessa etapa do trabalho são abordados nos tópicos desta seção.

Neste trabalho de tese os dados InSAR utilizados foram coletados da Floresta Nacional de Tapajós pelo sistema AeS1. Os MDEs gerados foram disponibilizados sob a forma de imagens de superfícies em formato de grade regular com resolução horizontal de 2.5 metros. Esse tipo de representação de dados de superfície é caracterizado na literatura como imagens de formato 2.5D, pois representam diretamente a estrutura tridimensional da cena imageada pelo sensor (TRUCCO e VERRI, 1998). Os modelos utilizados foram

os originais gerados pelo sistema AeS-1 acrescidos de um deslocamento vertical de - 13.11 metros aplicado por Dutra et al. (2002), após o tratamento dos *outliers*.

Os dados topográficos de controle medidos em campo foram processados e calculados usando os procedimentos próprios de cada método de levantamento de campo e estão disponibilizados sob forma de nuvens ou conjuntos de pontos representados por suas coordenadas planas cartesianas no sistema UTM e suas altitudes elipsoidais. Todos os dados foram calculados ou convertidos para o sistema geodésico de referencia WGS-84. Os conjuntos de pontos topográficos ou as superfícies tridimensionais produzidas a partir deles, constituem a estrutura fundamental de controle de onde foram extraídas todas as feições para correção dos modelos InSAR.

As correções de erros propostas para os modelos consistem em trazer os conjuntos de dados InSAR em banda P e banda X, representados pelos respectivos MDEs, para um melhor alinhamento possível com o conjunto de feições e áreas topográficas de controle medidas com instrumentos e métodos de alta precisão. A estratégia geral dos métodos propostos consiste na aplicação de vários níveis de ajustes geométricos que empregam diferentes algoritmos e funcionalidades adaptativas. Em cada nível de correção aplicado avaliou-se, por meio de procedimentos apropriados, os parâmetros estatísticos indicadores de qualidade do tratamento, tais como: mínimos, máximos, médias, variâncias, desvios absolutos e desvios padrão. Esses parâmetros constituíram a base de comparação para avaliar a melhoria dos modelos ajustados em relação aos modelos originais e dados de referências de verdades terrestres.

#### 3.5.1 – Método de correção por deslocamento vertical

O método do deslocamento vertical ou *offset* em altura para correção nos modelos InSAR consistiu de um deslocamento em altura nos MDEs da banda P e da banda X realizado por Dutra et al. (2002), com base na média da diferença de altitude encontrada entre os MDEs e um conjunto de pontos de controle de campo, medidos pela técnica GPS ao longo de estradas da região. O de *offset* em altura baseado na média das diferenças entre pontos de controle e pontos dos MDEs melhorou a qualidade dos modelos da banda P e da banda X aproximando-os da realidade geográfica de maneira uniforme para todos os

pontos. Entretanto, na metodologia do trabalho os pontos de controle utilizados foram medidos pelo método DGPS baseado no modo cinemático, onde o receptor móvel foi transportado a bordo de um veículo enquanto se realizavam as medições. Este método de levantamento GPS, apesar dos refinamentos proporcionados pelo processamento posterior das observações, não tem a mesma precisão dos métodos estáticos, que são os mais adequados para medição de pontos de controle (MONICO, 2000). Neste caso, os pontos podem sofrer a interferência da vegetação alta e dos taludes acentuados na lateral das estradas, causando perda de ciclos ou aumentando a diluição da precisão. O valor encontrado foi de -13.11 metros que foi somado a ambos os modelos. Um outro *offset* foi aplicado aos MDEs corrigidos por Dutra et al. (2002) no presente trabalho de pesquisa usando pontos de controle mais qualificados. A área geográfica coberta foi recortada nos limites exatos dos modelos corrigidos neste estudo para fins de comparação. No Capítulo 4, medidas de avaliação extraídas destes modelos corrigidos são comparadas com as dos métodos em estudo nesta pesquisa de tese.

## 3.5.2 – Método de correção por triangulação local com buffer de transição

Moura (2005) realizou um estudo de correção sobre os mesmos modelos InSAR trabalhados por Dutra et al. (2002), utilizando um método de triangulação local com *buffer* de transição. O principal objetivo do trabalho de Moura (2005) foi melhorar a qualidade geométrica dos MDEs InSAR por meio de uma correção que usou pequenos modelos de terrenos locais provenientes de levantamentos de campo realizados com alta precisão. Os pontos de controle de campo para geração dos pequenos modelos foram medidos pelos métodos topográficos de poligonação e irradiação, associadas com as técnicas de medição por rastreamento de sinais de satélites do sistema GPS utilizando o modo de posicionamento relativo estático com o posterior processamento de observações.

Foram feitas coletas de amostras de pontos topográficos de coordenadas precisas em áreas sem cobertura vegetal (estradas, pastagens, campos arados, etc.), existentes dentro dos limites dos MDEs. A partir das amostras provenientes dos levantamentos topográficos foram criados os pequenos modelos precisos de correção do terreno pelo método de triangulação usando o algoritmo de Delaunay. Os modelos triangulares foram

interpolados para modelos de grade regular na mesma resolução dos MDEs InSAR originais.

As diferenças entre os valores de altitudes dos pequenos modelos topográficos e os valores correspondentes do MDE InSAR original, serviram para calcular uma correção do tipo offset para cada área geográfica local. Nos limites de cada pequeno modelo foi estabelecida uma área de transição entre os dois modelos para aplicação de correção gradual a fim de evitar grandes descontinuidades e garantir uma transição suave nas bordas da área local corrigida. A transição entre regiões do modelo foi feita adotando-se buffers de 500 e 1000 metros a partir da borda de cada pequeno modelo topográfico e se estendendo para dentro do modelo InSAR. A diferença entre os dois modelos na zona de transição foi distribuída de forma proporcional à distância até à borda do pequeno modelo topográfico. Assim um pixel a zero metro da borda recebeu o valor do próprio modelo topográfico, no extremo oposto da zona de transição recebeu o valor do próprio modelo InSAR, no meio do caminho recebeu a média dos dois modelos e nos demais pontos recebeu uma média ponderada pelo afastamento da borda. A Figura 3.14-a mostra a imagem de tons de cinza do MDE processado pelo método descrito com a localização dos pontos de controle em vermelho. A Figura 3.14-b mostra as superfícies de correções calculadas com o buffer de transição.

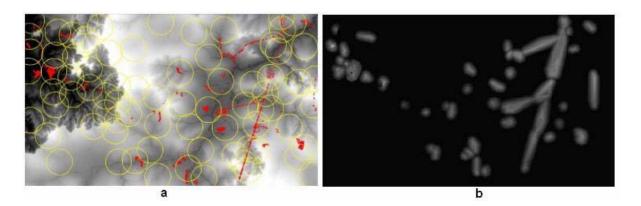


Figura 3.14 – (a) MDE e (b) correções calculadas pelo método da triangulação com *buffer* de transição.

FONTE: Moura (2005).

O método da triangulação local com *buffer* de transição melhorou os modelos localmente nas regiões cobertas pelas amostras, assim como, nas suas imediações, porém, não teve

influência nos modelos InSAR longe das áreas de amostras, fora das áreas de transição (Figura 3.14-b). Para produzir bons resultados sobre toda a extensão do modelo, utilizando esse procedimento, é necessário aumentar bastante o número de amostras de campo. Essa recomendação levada ao extremo pode ser equivalente a gerar um novo modelo inteiramente apoiado por amostras de campo, o que pode ser inviável devido ao esforço de trabalho e pela presença de extensa cobertura de florestas. Detalhes mais completos desse processo de correção estão reportados em Moura, (2005). Um método similar, baseado em triangulação, foi aplicado no presente trabalho de pesquisa de tese com pontos de controle mais qualificados. A área geográfica coberta pelos MDEs foi recortada nos limites exatos dos modelos corrigidos neste estudo para fins de comparação. No Capítulo 4 as medidas de avaliação extraídas dos modelos de Moura (2005) com *buffer* de transição de 1000 metros são comparadas com as dos métodos em estudo aplicados neste trabalho de pesquisa.

#### 3.5.3. Estrutura geral e contribuições dos métodos de correção aplicados

Os métodos desenvolvidos no presente trabalho de pesquisa de tese representam um ganho em relação aos estudos de Dutra et al. (2002) e Moura (2005) realizados na área de trabalho da Floresta Nacional de Tapajós e apresentam vários diferenciais em relação aos outros estudos encontrados na literatura. Os métodos usados no trabalho consistem na aplicação de cinco níveis de correções baseadas em funções de interpolação com graus variáveis de influência local e global. Para fins de sistematização do trabalho os cinco métodos avaliados na pesquisa foram denominados: *Offset*; Triangulação, IQD, *Splines* e Krigagem. Os nomes estão diretamente associados às funções de interpolação utilizadas para geração das superfícies de correção. Os pontos de controle para essa etapa de correção, total de 1271 pontos, foram separados por áreas geográficas em 31 agrupamentos locais distintos, com cerca de 40 pontos para cada área. Seis diferentes arranjos dos pontos e áreas de controle foram utilizados para testar os cinco métodos de correção propostos. Os arranjos foram organizados com a seguinte estrutura:

1) dois conjuntos para treinamento e teste. O conjunto de treinamento com 21 áreas de controle, equivalente a 2/3 do total de pontos e o conjunto de teste com 10 áreas de controle, equivalente a 1/3 do total de pontos;

- dois conjuntos para treinamento e teste com a metade do total em cada. O conjunto de treinamento com 16 áreas de controle e o conjunto de teste com 15 áreas de controle;
- 3) um conjunto para treinamento com 31 áreas, equivalente a totalidade das áreas de controle e o conjunto de testes equivalente ao conjunto de treinamento;
- 4) dois conjuntos para treinamento e teste, considerando a troca das áreas de teste originais pelas áreas de treinamento e vice-versa, assim, o conjunto de treinamento é constituído de 21 áreas de controle, equivalente a 2/3 do total de pontos e o conjunto de teste com 10 áreas de controle, equivalente a 1/3 do total de pontos;
- 5) dois conjuntos para treinamento e teste com a metade do total em cada, correspondentes à troca das áreas de teste originais pelas áreas de treinamento e vice-versa, desta forma o conjunto de treinamento possui 15 áreas de controle e o conjunto de teste com 16 áreas de controle;
- 6) um conjunto para treinamento com 31 áreas, considerando a troca das áreas de teste originais pelas áreas de treinamento e vice versa, equivalente à totalidade das áreas de controle com o conjunto de testes equivalente ao conjunto de treinamento. Este arranjo é equivalente ao arranjo 3, portanto, resulta efetivamente um total de cinco arranjos.

A Tabela 3.1 fornece um resumo dos totais das áreas e dos pontos usados nos arranjos da estrutura de controle.

Tabela 3.1 – Resumo dos totais de áreas e pontos usados nos arranjos de pontos de controle.

Arranjo	Número de A	Áreas	Número de Pontos	
	Treinamento Teste		Treinamento	Teste
1	21	10	850	421
2	16	15	651	620
3	31	31	1271	1271
4	21	10	835	436
5	15	16	616	655

6	31	31	1271	1271

Estes cinco arranjos de pontos de controle combinados com as cinco funções base de correção produziram um total de 25 conjuntos de treinamento, 25 conjuntos de teste e 25 diferentes aplicações de correções para os MDEs banda P e Banda X. As 25 superfícies de correção geradas com os os conjuntos de pontos de treinamento foram submetidas a avaliações com os pontos de teste, produzindo 25 conjuntos de estatísticas globais de teste para cada banda. Cada uma dessas áreas individuais de treinamento e de teste é composta por amostras pontuais. Estas amostras foram também usadas individualmente para fazer avaliações locais nos modelos, gerando estatísticas para fins de avaliação dos métodos de correção quanto à melhoria local dos MDEs.

As amostras utilizadas nessa etapa da pesquisa foram escolhidas com base na melhor distribuição geográfica possível dentro da área de estudo. Tratando-se da modelagem de erros e resíduos as amostras foram assumidas como tendo distribuição normal em várias modelagens. A análise dos parâmetros de assimetria e curtose, assim como, as médias, medianas e modas extraídas das amostras ajudaram a comprovar a normalidade aproximada das distribuições. Em uma distribuição completamente normal os parâmetros de assimetria e curtose são, respectivamente, zero e três, enquanto a média, a mediana e a moda devem ter seus valores coincidentes. A Figura 3.15 mostra a distribuição geográfica das áreas de treinamento na cor vermelha e das áreas de teste na cor azul dentro da imagem da área de estudo. Embora essa distribuição geográfica dos pontos de controle possa parecer inadequada, foi a melhor possível considerando as severas limitações do ambiente da floresta tropical. De um modo geral, independentemente do método de correção, quanto mais pontos fiduciais disponíveis e quanto melhor a distribuição espacial desses pontos no MDE mais confiáveis são os resultados de correção e avaliação.

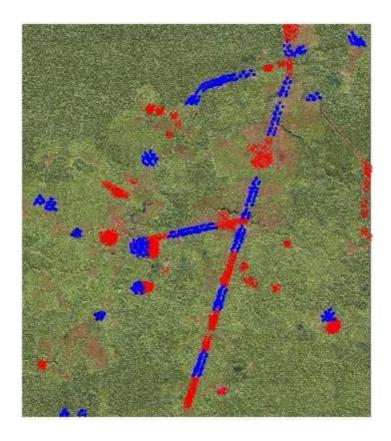


Figura 3.15 – Distribuição geográfica das áreas de treinamento (vermelho) e de teste (azul) sobre uma imagem de fusão banda X em amplitude com LANDSAT RGB.

As estatísticas resultantes dos pontos de controle de teste nos modelos corrigidos constituíram a base para consolidação das análises, discussões e conclusões do trabalho, porém, outros critérios complementares também foram utilizados. Testes utilizando dados fiduciais medidos embaixo da cobertura florestal, dados de varredura a laser, perfis de superfícies extraídos dos modelos, avaliações de produtos derivados dos MDEs, como o MDA, estruturas de florestas e estimativas de biomassa derivadas do MDA foram os critérios complementares mais importantes.

## 3.5.4. Ajuste de uma superfície plana (offset) para correção dos modelos

O nível mais simples de correção usado no estudo foi um *offset* em altura, ou seja, uma translação dos modelos no eixo vertical. O valor do *offset* foi determinado pela média das diferenças de altitudes entre o conjunto de pontos topográficos da estrutura de controle escolhidos para treinamento (geração da superfície de correção) e os seus

correspondentes nos modelos de elevação InSAR. A superfície de correção gerada é completamente plana, assim, o procedimento corresponde a uma correção dos modelos pela soma de uma superfície plana. O cálculo da superfície de *offset* foi feito usando os conjuntos de dados topográficos como nuvens de pontos e localizando os seus correspondentes nos modelos de elevação InSAR para cálculo da diferença. A formulação matemática utilizada na determinação da superfície de correção por *offset* em altura é dada pela Equação 3.7

$$e_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} (h_T - h_S) \tag{3.7}$$

e a precisão do offset é estimada pela Equação 3.8

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} (h_T - h_S)^2}$$
 (3.8)

onde  $e_m$  é o valor de correção (*offset*) a ser somado a todos os pixels do modelo digital de elevação,  $e_{RMS}$  é o desvio padrão dos erros em torno do *offset*, N é o total de pontos de controle utilizados,  $h_T$  é altitude medida pelos métodos de campo e  $h_S$  é a altitude proveniente da medida do sensor, extraída do modelo digital de elevação da banda P ou da banda X (TIMBÓ ELMIRO et al., 2003).

Os parâmetros estatísticos e indicadores numéricos para análise da qualidade da correção pelo método do *offset* relativos aos dados de teste, considerando os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle são mostrados na Tabela 3.2. Os títulos das colunas da tabela referem-se, respectivamente, aos MDEs (banda X e banda P), tipos de arranjos de pontos de controle conforme definidos na Seção 3.5.3, mínimos, máximos, médias, desvios absolutos (MAE) e desvios padrão dos erros (RMSE). Todas as unidades de medidas usadas nas tabelas são expressas em metros.

Tabela 3.2 – Indicadores numéricos da qualidade da correção dos MDEs pelo método do offset para dados de teste relativos a todos os arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
	1	-7.993	6.923	-0.083	2.413	3.068
	2	-7.955	6.831	-0.182	3.065	3.795
P	3	-8.034	6.941	0.000	2.418	3.025
	4	-7.987	6.898	-0.128	2.744	3.437
	5	-7.834	6.741	-0.253	3.038	3.811
X	1	-6.045	8.032	0.066	2.359	2.910
	2	-5.996	7.889	0.173	2.814	3.421
	3	-6.163	8.151	0.000	2.327	2.901
	4	-6.011	7.997	0.122	2.684	3.271
	5	-5.989	7.882	0.238	2.611	3.367

A Figura 3.16 ilustra de forma esquemática a lógica da correção pelo método do *offset*, que equivale a somar um valor numérico constante a todos os pixels do MDE. Por exemplo, no caso do arranjo tipo 1 os valores somados foram -0,296 metros para a banda P e 0,363 metros para a banda X indicando que os modelos já tinham um ajuste geral global bastante próximo da verdade geográfica. Outros arranjos produziram valores ligeiramente diferentes.



Figura 3.16 – Representação esquemática da correção pelo método do *offset*.

Este método de *offset* foi aplicado sobre os MDEs corrigidos no trabalho de Dutra et al. (2002) usando um conjunto de pontos de controle mais confiáveis e com melhor distribuição geográfica. No Capítulo 4 é feita uma análise geral com a discussão dos

dados estatísticos e gráficos relativos ao método do *offset* enfocando os aspectos comparativos com os demais métodos de correção.

#### 3.5.5. Superfície de correção por triangulação com interpolação linear

O segundo nível de correção aplicado para ajuste dos MDEs da FLONA Tapajós permite maior flexibilidade adaptativa aos erros locais de magnitudes variáveis identificados nos modelos. A correção foi realizada por meio da construção de uma superfície de erros determinada por uma malha triangular irregular, definida sobre os pontos de amostras, seguida de interpolação pelo método linear para geração da grade regular que define a superfície de correção.

Segundo Fogel (1995), este processo de correção é denominado método de elementos finitos sobre triângulos devido a sua atuação local estritamente dentro dos limites de cada triângulo da malha, onde cada triângulo forma um pedaço independente que se liga ao vizinho pela aresta comum. Qualquer tipo de triangulação pode ser aplicado para a construção dos elementos finitos, porém, uma abordagem mais apropriada para aplicação de modelagem do relevo geográfico requer a formação de triângulos com melhor rigidez geométrica, inclusão dos conceitos de proximidade geográfica e de vizinhança local. O método adotado foi o da triangulação baseada no algoritmo de Delaunay que produz uma malha de triângulos construídos segundo o critério do circuncírculo. Este critério estabelece que o círculo definido pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não poderá conter no seu interior nenhum ponto do conjunto de amostras além dos vértices do próprio triângulo (OKABE et al., 1992). Os pontos de amostras originais são conectados de forma que nenhuma borda do triângulo pode ser cruzada por outros triângulos. Este procedimento maximiza os menores ângulos dos triângulos formados e minimiza os maiores circuncírculos, propiciando uma representação mais ajustada à realidade das variações do relevo geográfico (SHEWCHUK, 1999). A aplicação do algoritmo de Delaunay sobre as amostras resulta em um bloco formado por faces triangulares onde cada um dos triângulos define um plano sobre os pontos da grade que se encontram dentro do triângulo. A declividade e a elevação em qualquer posição são determinadas pelos três pontos de dados originais que definem o triângulo. Todos os nós da grade regular dentro de um dado triângulo são completamente definidos pela superfície triangular. De um modo geral, o método de triangulação com interpolação linear funciona melhor quando os dados de amostras seguem leis que regulam a formação das feições da superfície modelada. Malhas triangulares com pontos de amostras distribuídos de forma inadequada costumam resultar em faces triangulares mal condicionadas que produzem resultados ruins de interpolação.

A Figura 3.17-a ilustra, na forma de imagem de tons de cinza, a superfície de correção determinada pelo método de triangulação com interpolação linear do MDE da banda P e a Figura 3.17-b fornece os mesmos dados para a banda X, relativos ao arranjo tipo 2 dos pontos da estrutura de controle. A localização dos pontos das amostras de treinamento é destacada em vermelho na imagem da superfície de correção da banda P. Na representação do MDE através de imagens, os tons de cinza mais escuros correspondem aos menores valores numéricos, enquanto os tons mais claros representam os valores numéricos maiores.

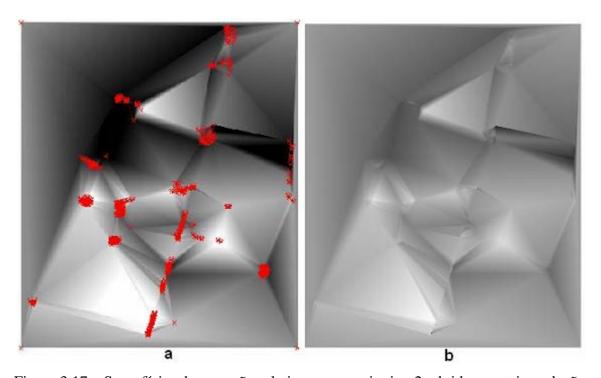


Figura 3.17 – Superfícies de correção relativas ao arranjo tipo 2, obtidas por triangulação com interpolação linear: (a) banda P destacando pontos das amostras de treinamento em vermelho e (b) banda X.

A Tabela 3.3 mostra os valores numéricos (mínimos, máximos, médias, desvios absolutos e desvios padrão) que representam a qualidade da correção pelo método da triangulação com interpolação linear, obtidos a partir dos dados de teste, com todos os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle. Os dados das tabelas são fornecidos em unidades métricas.

Tabela 3.3 – Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método da triangulação para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
	1	-3.723	3.956	-0.066	1.405	1.864
	2	-4.102	3.942	-0.146	1.581	1.912
P	3	-0.491	0.386	0.000	0.043	0.052
	4	-3.157	4.751	-0.103	1.552	1.890
	5	-3.992	4.712	-0.203	1.602	1.947
X	1	-2.427	1.856	0.050	1.230	1.560
	2	-3.216	2.201	0.130	1.303	1.691
	3	-0.450	0.317	0.000	0.031	0.037
	4	-3.139	2.067	0.092	1.298	1.611
	5	-4.216	2.201	0.179	1.303	1.712

A principal diferença deste método de ajuste por triangulação em relação ao trabalho realizado por Moura (2005) deve-se à seleção e utilização de diferentes conjuntos de pontos de controle para cálculo das superfícies de correção. Outras diferenças se refletem nos cinco diferentes arranjos da estrutura de pontos de controle e na construção da malha de elementos triangulares realizada de modo global, considerando todo o modelo em uma operação única, enquanto Moura (2005) usou pequenas malhas triangulares isoladas. Os parâmetros de avaliação desse método de correção e as comparações dos resultados com outros métodos são analisados no Capítulo 4.

#### 3.5.6 Superfície de correção pelo inverso do quadrado da distância

O terceiro nível de correção empregado para ajustar os MDEs de Tapajós, afetados por erros locais de valores variáveis, é baseado na geração de uma superfície de correção usando o método de interpolação com valores ponderados pelo inverso do quadrado da distância (IQD). A interpolação pelo inverso do quadrado da distância supõe

explicitamente que as feições mais próximas umas das outras são mais semelhantes do que aquelas que estão mais separadas. Esta suposição é bastante coerente com a modelagem de dados geográficos e está embutida na base de vários processos de modelagem natural e ambiental (MILLER, 2004). Assim, o método do IQD é teoricamente adequado para dados geográficos na forma de modelos de elevação.

Para estimar um valor de qualquer posição que não foi medida diretamente, o interpolador IQD utilizou os valores medidos na vizinhança da posição a ser estimada. Os dados de amostras foram ponderados durante a interpolação, de modo que a influência de um ponto de amostra, em relação a outro, decresceu com o aumento da sua distância ao nó da grade que está sendo interpolado (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Assim, o inverso do quadrado da distância supõe que cada ponto medido tem uma influência local que diminui muito com o crescimento da distância ao ponto estimado.

Ao calcular um nó da grade, os pesos atribuídos aos pontos de dados de amostras são frações e a soma de todos os pesos é igual à unidade. Se uma observação particular é coincidente com um nó da grade, sua distância ao nó é zero e a observação tem peso unitário, para todas as observações restantes são atribuídos pesos zero. Assim, se um nó da grade coincide com uma amostra, lhe é atribuído o valor da própria amostra coincidente.

Um dos inconvenientes do método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância é a tendência de produzir feições em forma de "olho de touro" em volta da posição das amostras dentro da área da grade. Um parâmetro de suavização pode ser atribuído durante o cálculo da interpolação para reduzir esse tipo de efeito, tornando a grade interpolada mais uniforme e suavizada. A formulação matemática geral para interpolação da superfície pelo inverso do quadrado da distância é dada na Equação 3.9

$$h_{j} = \sum_{i=1}^{n} h_{i} \cdot d_{ij}^{-2} / \sum_{i=1}^{n} d_{ij}^{-2}$$
(3.9)

onde  $h_j$  é o valor de correção altimétrica interpolado para um nó j da grade,  $h_i$  refere-se ao valor das amostras de medidas de correção altimétrica, o índice j refere-se aos pontos que estão sendo interpolados, o índice i refere-se aos pontos de dados das amostras, d é a

distância entre os pontos i e j, e n é o número de pontos de dados de amostras usados para interpolar o nó da grade. Pela Equação 3.9 nota-se que, se a distância aumenta, o peso de ponderação é reduzido. O expoente 2 em  $d^{-2}_{ij}$  dá uma ênfase muito maior aos pontos mais próximos e a superfície resultante pode não ficar muito suavizada, apresentando mudanças muito rápidas. A Figura 3.18-a ilustra a superfície de correção do modelo digital de elevação banda P e a Figura 3.18-b mostra os mesmos dados da banda X, relativos ao arranjo tipo 2, determinados pelo método de ponderação pelo IQD. A localização dos pontos de dados das amostras de treinamento está destacada, na cor vermelha, na imagem da banda P.

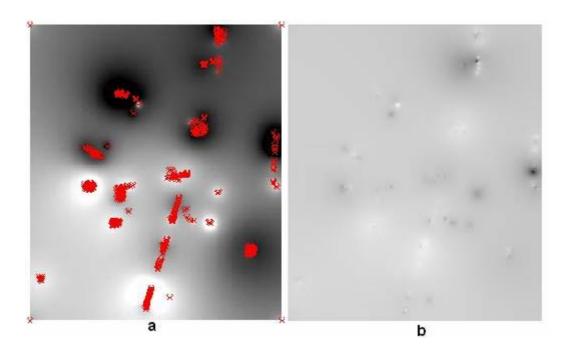


Figura 3.18 – Superfícies de correção pelo IQD relativas ao arranjo tipo 2, (a) banda P destacando os pontos de amostra, em vermelho, e (b) banda X.

A Tabela 3.4 mostra os indicadores numéricos (mínimos, máximos, médias, desvios absolutos e desvios padrão) que representam a qualidade da correção pelo método do IQD para os dados de teste, considerando os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle.

Tabela 3.4 – Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método do IQD para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
	1	-3.385	3.597	-0.062	1.368	1.694
	2	-3.729	3.584	-0.137	1.453	1.744
P	3	-0.447	0.351	0.000	0.035	0.047
	4	-2.870	4.319	-0.097	1.411	1.715
	5	-3.629	4.284	-0.190	1.456	1.751
	1	-2.670	2.041	0.053	1.353	1.743
	2	-3.537	2.421	0.139	1.433	1.870
X	3	-0.495	0.349	0.000	0.035	0.041
	4	-3.453	2.273	0.098	1.428	1.805
	5	-4.637	2.421	0.190	1.563	1.901

No Capítulo 4 é feita uma análise geral dos dados estatísticos e gráficos relativos a este método de correção de MDE com as discussões adequadas para fins de comparação com os demais métodos e consolidação de conclusões.

## 3.5.7 Superfície de correção pelo método de splines

As Figuras 3.17 e 3.18 e as Tabelas 3.3 e 3.4 indicam que o método de triangulação com interpolação linear e o método do inverso do quadrado da distância fazem ajustes locais com eficiência, porém, apresentam transição brusca entre as regiões de influência das amostras, que pode ser visualmente observada nas Figuras 3.17 e 3.18. Para correção de deformações intrinsecamente locais nos dados de modelos digitais de elevação InSAR pode ser eficiente usar funções fragmentadas que façam ajuste de uma superfície de curvatura mínima aos pontos de amostras (AUDETTE et al., 2000; CACHIER et al., 2003). Esta idéia foi adotada no trabalho por meio da aplicação de correção por funções *splines* que podem produzir bons resultados. A teoria e as aplicações de *splines* é um tema extenso e diversificado, de modo que os conceitos, formulações e aprofundamento do assunto estão disponíveis na literatura da área (DE BOOR, 1978; BURROUGH e MCDONNELL, 1998; GOSHTASBY, 1988). A abordagem teórica do assunto neste trabalho é resumida, destacando apenas os pontos de interesse voltados para o caso de estudo.

As *splines* tornaram-se populares quando de Boor (1978) desenvolveu um pacote computacional de rotinas para suas aplicações numéricas. O ajuste por *splines* usa polinômios que são definidos sobre regiões distintas e sem sobreposição. Os coeficientes dos polinômios são escolhidos de forma que algumas condições sejam satisfeitas nas bordas onde as duas regiões se juntam. A primeira condição é que os valores ajustados dos polinômios sejam os mesmos, a outra é que uma ou mais das derivadas tenham uma coincidência tão perfeita de modo que a declividade (primeira derivada) seja contínua. É possível coincidir os valores da função e as primeiras derivadas nas duas pontas do intervalo, resultando em uma junção suficientemente suave para a maioria dos propósitos.

Funções *splines* são os equivalentes matemáticos das réguas flexíveis utilizadas fisicamente em desenho técnico, ajustam-se com bastante exatidão aos pontos de amostras e garantem que a junção entre uma parte e outra de uma curva ou de uma superfície seja contínua. Conceitualmente, equivale a dobrar uma folha de borracha de modo que ela passe pelos pontos de amostra ao mesmo tempo em que ocorre a minimização da curvatura total da superfície (NUSS e TITLEY, 1994). Assim, *splines* ajustam uma função matemática a um certo número de pontos de amostras mais próximos do nó a ser estimado ao mesmo tempo em que passam por todos os pontos de amostra. Dessa forma, é possível ajustar uma parte local da superfície com certa independência de todo o conjunto e, ao mesmo tempo, garantir propriedades de suavização e aproximação.

A idéia embutida no ajuste é aproximar uma função através de um polinômio que seja definido por pedaços (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Não é um método muito apropriado, quando há variações muito grandes dentro de uma distância horizontal curta porque pode ocorrer saturação dos valores estimados, conduzindo a erros. As primeiras aplicações de *splines* para o ajuste de superfície foram feitas por Goshtasby (1988). As *splines* de superfícies usadas por Goshtasby foram chamadas de *thin plate splines* (TPS), refletindo a natureza do problema de ajustar uma superfície como sendo uma fina placa flexível tensionada por cargas pontuais. A solução por *thin plate splines* minimiza a uquantidade de energia de dobramento aplicada à superfície nas áreas tensionadas. À medida que se afasta dos pontos de carga a função apresenta um comportamento quase

linear. Portanto, embora sejam funções de interpolação globais as influências de deformações locais tendem a diminuir com o afastamento dos pontos de amostras. Esse critério de minimização de energia tem sido incorporado em vários modelos físicos e na modelagem de processos visuais, de modo que sua aplicação na modelagem de dados naturais como o relevo topográfico pode ser vantajosa. Dadas n amostras por suas coordenadas (x, y), o modelo de TPS utilizado neste trabalho pode ser definido pela Equação 3.10.

$$f(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} b_i . r_i^2 \ln r_i^2$$
(3.10)

Com as restrições dadas pela Equação 3.11.

$$\sum_{i=0}^{n-1} b_i = \sum_{i=0}^{n-1} b_i . x_i = \sum_{i=0}^{n-1} b_i . y_i = 0$$
(3.11)

onde  $r_i^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2$ . Outros detalhes sobre a teoria das *splines* podem ser consultados em Franke e Nielson (1991) que fazem uma discussão introdutória detalhada e compreensível do assunto. A Figura 3.19-a ilustra a imagem de tons de cinza da superfície de correção do MDE InSAR determinada pelo método de *splines* para a banda P e a Figura 3.19-b mostra os mesmos dados para a banda X, referentes ao arranjo tipo 2 dos pontos de controle. Os pontos em vermelho sobrepostos à imagem da banda P referem-se à localização das amostras usadas no treinamento.

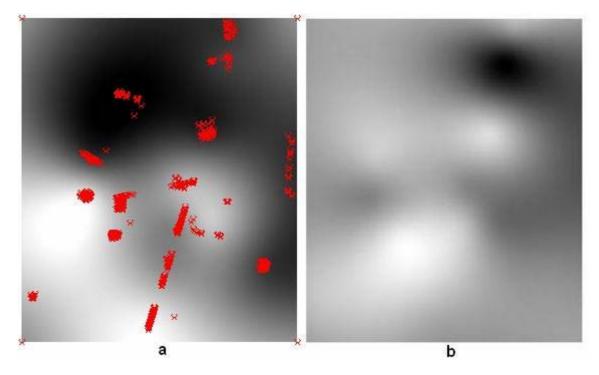


Figura 3.19 – Superfícies de correção por *splines*, (a) banda P com destaque para os pontos de amostra em vermelho, e (b) banda X.

A Tabela 3.5 mostra os indicadores (mínimos, máximos, médias, desvios absolutos e desvios padrão) que representam a qualidade da correção pelo método de *splines* calculados a partir dos dados de teste, considerando os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle. No Capítulo 4 é feita uma análise e discussão integrada dos dados estatísticos e gráficos relativos a este método de correção de MDE no contexto geral dos métodos de correção.

Tabela 3.5 – Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método de *splines* para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
	1	-4.231	4.496	-0.079	1.710	2.118
	2	-4.661	4.480	-0.173	1.817	2.273
P	3	-0.559	0.439	0.000	0.041	0.059
	4	-3.588	5.399	-0.122	1.764	2.128
	5	-4.536	5.355	-0.241	1.820	2.254
	1	-3.034	2.320	0.063	1.538	1.950
X	2	-4.020	2.751	0.165	1.691	2.178
	3	-0.562	0.397	0.000	0.032	0.046
	4	-3.924	2.584	0.116	1.623	2.054
	5	-5.270	2.751	0.226	1.812	2.203

#### 3.5.8 Superfície de correção pelo método de krigagem

Quando existe abundância de amostras, a maioria dos métodos de interpolação produz resultados parecidos, entretanto, se a amostragem dos dados é esparsa, as suposições feitas sobre as variações espaciais e a escolha dos métodos e de seus parâmetros podem ser críticas e conduzir a resultados errados. No caso de estudo deste trabalho o número de elementos da amostra não foi considerado pequeno (total de 1271 pontos de controle para treinamento e teste), mesmo assim, é importante testar diferentes métodos para análise de alternativas, portanto, uma correção usando krigagem foi aplicada aos MDEs da FLONA Tapajós. A krigagem é uma tentativa de fazer a otimização da interpolação através da separação da variação espacial em componentes. A componente de variação espacialmente autocorrelacionada, mas fisicamente difícil de explicar é embutida em funções como os autovariogramas e semivariogramas, que fornecem informação para otimização dos pesos e para buscas dos raios de efeito da interpolação.

A krigagem tem sido muito utilizada para áreas de aplicações onde historicamente costuma haver correlação espacial ou tendências direcionais. No caso de modelagem de erros do relevo para correção, poucos relatos trataram deste assunto. Mesmo assim, o método de interpolação foi implementado na correção dos modelos da FLONA Tapajós, visando prevenir a possibilidade de correlações ou tendências espaciais nos dados introduzidas por fatores desconhecidos ou pouco compreendidos que podem ocorrer no processo de formação do MDE pelo método InSAR. A teoria e aplicações da krigagem é um tema extenso cujo aprofundamento de conceitos pode ser encontrado na literatura pertinente (BURROUGH e MCDONNELL, 1998; STEIN, 1999).

Na interpolação por krigagem, caso haja correlação entre os dados, essa correlação pode variar conforme a direção e a distância entre os pares de elementos considerados e pode ser usada para explicar as variações na superfície. A krigagem faz o ajuste de uma função matemática a um certo número de pontos ou a todos os pontos dentro de um determinado raio para calcular o valor de cada posição da grade de interpolação. É um processo de múltiplos passos que inclui a análise estatística exploratória dos dados, a modelagem do variograma, a criação da superfície e, como passo opcional, a exploração da superfície de variação (STEIN, 1999). O uso deste tipo de função é mais apropriado para interpolação

quando existe uma distância espacialmente correlacionada ou uma tendência direcional nos dados.

Assim, como no método do IQD, a krigagem pondera os valores dos elementos da amostra medidos na vizinhança para estimar o valor de uma posição que não foi medida. A fórmulação geral para o interpolador de krigagem é muito similar à fórmula do IQD, apresentada na Equação 3.9. Entretanto, no IQD, o peso depende exclusivamente da distância até à posição da amostra para cálculo dos nós da grade, enquanto na krigagem leva-se em conta também o arranjo espacial total entre os pontos de amostras, medidos através da quantificação da autocorrelação espacial. Assim, na krigagem, os pesos  $w_i$  dependem de um modelo ajustado aos pontos da amostra medidos, da distância até a posição estimada e dos relacionamentos espaciais entre os valores amostrais medidos em torno da posição do local da estimação.

Para criar o variograma experimental é necessário calcular a distância entre cada par de pontos por meio de suas coordenadas (x, y) pela Equação 3.12.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$
(3.12)

A semivariância experimental ( $\gamma_{ij}$ ) é a metade do quadrado da diferença entre os valores da amostra  $z_i$  e  $z_i$  dos dois locais, dada pela Equação 3.13.

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} (z_i - z_j)^2. \tag{3.13}$$

As semivariâncias experimentais são plotadas contra as distâncias produzindo um variograma experimental, o qual não pode ser usado diretamente porque só fornece estimativas discretas. Um modelo é, então, ajustado ao variograma experimental que pode, então, ser usado para achar valores de variograma para quaisquer distâncias. O modelo de variograma ajustado utilizado neste trabalho foi do tipo exponencial dado pela Equação 3.14.

$$\gamma(d) = e^{(-3d/R)} \tag{3.14}$$

Onde d é a distância entre dois pontos da amostra, calculada pela equação 3.12 e R é o raio de ação do modelo, a partir do qual o variograma permanece praticamente constante.

Um sistema de n+1 equações é resolvido para achar os coeficientes de interpolação  $w_i$  em um local de estimação qualquer pela Equação 3.15.

$$\Gamma \times w = g \tag{3.15}$$

Onde  $\Gamma$  é a matriz variância-covariância calculada dos pontos de dados, w é o vetor coluna dos pesos a serem calculados e g o vetor coluna das semivariâncias ajustadas dos locais de estimação, calculadas a partir da vizinhança. O valor de cada ponto de interpolação da superfície é calculado pela Equação 3.16.

$$\overline{z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} w_i . z(s_i)$$
(3.16)

Onde  $z(s_0)$  é o valor estimado no local  $s_0$  e  $z(s_i)$  são os valores de amostras em locais da vizinhança. No método da krigagem os dados amostrais são usados duas vezes, inicialmente para estimar a autocorrelação espacial e depois para calcular os valores interpolados. Com uma grande quantidade de dados amostrais os cálculos tornam-se demorados gerando alto custo computacional. A Figura 3.20-a ilustra a superfície de correção referente ao arranjo tipo 2 de pontos da estrutura de controle calculada pelo método da krigagem para o MDE da banda P e a Figura 3.20-b mostra o mesmo resultado para a banda X.

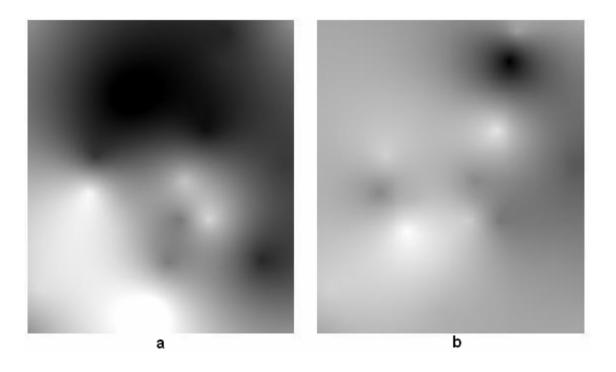


Figura 3.20 – Superfícies de correção por kigagem, (a) banda P e (b) banda X.

A Tabela 3.6 mostra os parâmetros estatísticos (mínimos, máximos, médias, desvios absolutos e desvios padrão) indicadores da qualidade da correção dos modelos pelo método da krigagem calculados a partir dos dados de teste, considerando os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle.

No Capítulo 4 é feita a análise e discussão dos dados numéricos e gráficos relacionados a este método de correção de MDE no contexto geral das correções e avaliações para fins de comparações e consolidação das conclusões do trabalho.

Tabela 3.6 – Indicadores numéricos da qualidade da correção pelo método da krigagem para os dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle.

para c	para os dados de teste relativos dos emeo arranjos de pontos de						
MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE	
	1	-3.892	4.136	-0.075	1.573	1.949	
	2	-4.288	4.122	-0.164	1.621	1.990	
P	3	-0.514	0.404	0.000	0.041	0.054	
	4	-3.301	4.967	-0.116	1.623	1.976	
	5	-4.173	4.927	-0.228	1.675	2.018	
X	1	-2.791	2.134	0.059	1.415	1.794	
	2	-3.698	2.531	0.156	1.498	1.921	
	3	-0.517	0.365	0.000	0.038	0.043	
	4	-3.610	2.377	0.110	1.493	1.908	
	5	-4.848	2.531	0.214	1.643	2.021	

#### 3.6 – Estratégias complementares de avaliações dos MDEs

Além das avaliações gerais realizadas com os pontos independentes da estrutura de controle de campo coletados em áreas sem cobertura de vegetação, apresentadas nas Tabelas 3.2 a 3.6, outros testes complementares foram realizados para avaliar situações especiais da qualidade dos MDEs corrigidos pelos métodos propostos. Estas avaliações usaram dados de levantamentos topográficos coletados ao nível do solo sob cobertura florestada, dados de coordenadas tridimensionais obtidos por sistemas de varredura a laser e informações de inventários florestais disponíveis.

#### 3.6.1 – Avaliação do MDE da banda P com pontos medidos no chão da floresta

Apesar das dificuldades de penetração na floresta amazônica para executar medições topográficas, vários pontos de controle para testes especiais foram medidos sob a

cobertura de florestas primárias e regenerações de diferentes idades nos anos de 2000, 2002 e 2003 (MOURA, 2005; TIMBÓ ELMIRO, 2003). No ano de 2005, outros pontos de testes foram medidos em áreas que já estavam desmatadas, para fins de cultivo agrícola, mas que eram florestas na época de realização dos vôos InSAR (TIMBÓ ELMIRO et al., 2007a,b). Os métodos de levantamentos utilizados na medição dos pontos sob a floresta foram baseados nas irradiações e poligonações topográficas com uso de estação total. Os levantamentos partiram sempre de dois pontos de apoio determinados por observações GPS, situados em áreas sem coberturas florestais, utilizando métodos de posicionamento relativo em modo estático, conforme detalhamentos já abordados no Capítulo 3. Estes tipos de amostras serviram, especialmente, para fazer avaliação do MDE da banda P. Confrontando as amostras com os MDEs, esses pontos de testes ajudaram a responder a questões relacionadas à penetração do sinal do sensor radar através do dossel da floresta densa e questões de qualidade das correções executadas pelos métodos pesquisados. Devido às dificuldades logísticas e operacionais, não foi possível obter quantidades e distribuição geográficas satisfatórias de amostras para esta fase de avaliação, entretanto os dados disponíveis podem ser considerados suficientes para inferir conclusões restritas aos limites da área de estudo. A Figura 3.21 mostra a localização geográfica, dentro da área de estudo, das parcelas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 denominadas, respectivamente, F9, F10, J5, F16, CEMEX, R37 e SOJA, medidas sob florestas e regenerações para esta fase de avaliação. Os valores confiáveis da elevação dos pontos medidos no chão da floresta, através dos métodos topográficos, foram subtraídos dos seus valores correspondentes localizados nos MDEs da banda P.

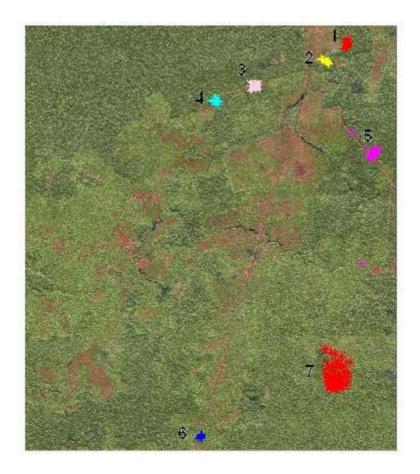


Figura 3.21 – Localização das áreas medidas sob a floresta para avaliações complementares.

Os resultados numéricos dessa fase da avaliação que representam as discrepâncias entre a verdade terrestre e os dados do modelo banda P são analisados com detalhes no Capítulo 4.

Na campanha de 2005 foi identificada uma extensa área recém desmatada para fins de cultivo agrícola que era coberta por florestas no ano 2000, época do vôo de aquisição dos MDEs InSAR (parcela 7 da Figura 3.21). Nessa área, que engloba cerca de 100 hectares, foi feito um levantamento topográfico detalhado onde as medições topográficas acompanharam as feições do terreno definidoras do relevo, ou seja, os pontos e linhas de máximos e mínimos como os topos, cumeadas, ravinas e os pontos de mudanças de declive topográfico. A partir dos pontos medidos no levantamento topográfico, foi gerado um modelo digital de terreno (MDT) do tipo TIN obtido pela triangulação de Delaunay sobre as amostras. Em seguida o MDT foi refinado por interpolação linear para uma grade regular na mesma resolução do MDE InSAR. Foram, então, calculadas as

diferenças entre o MDT de campo e o MDE de Dutra et al. (2002), MDE de Moura (2005) e MDE corrigido pelo método do IQD (escolhido como o melhor para correção da banda P). A Figura 3.22 ilustra imagens dos recortes dos modelos usados nessa fase do trabalho: MDT de campo (Figura 3.22-a), MDE da banda P corrigido pelo método do IQD (Figura 3.22-b) e MDE da banda X corrigido pela triangulação (Figura 3.22-c). Os resultados quantitativos relativos a essa fase de avaliação são analisados de forma apropriada no Capítulo 4 para a consolidação de conclusões.

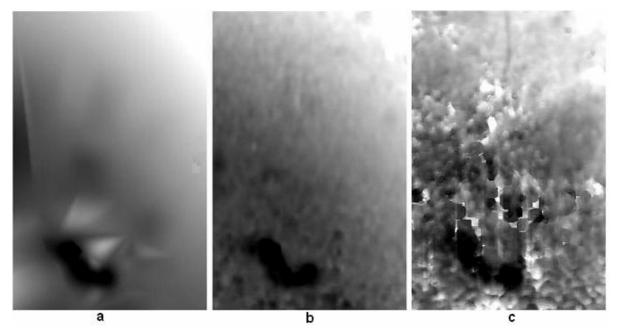


Figura 3.22 – Área de avaliação: (a) MDT do levantamento topográfico do chão da floresta, (b) MDE da banda P e (c) MDE da banda X.

# 3.6.2 – Avaliação dos MDEs da banda P e da banda X com os perfis de laser (LIDAR)

Os dados LIDAR utilizados nesta etapa do trabalho foram obtidos de um projeto de videografia executado na Floresta Nacional de Tapajós em 1999, com objetivo de fornecer informações auxiliares para avaliação de imagens e métodos de sensoriamento remoto (HESS et al., 2002; TIMBÓ ELMIRO et al., 2006). Este tipo de método de aquisição de dados para mapeamento de recursos da Terra evoluiu com o advento das câmeras de vídeo digitais de alta resolução e começou a ser empregado na Amazônia brasileira através da cooperação entre o INPE, a Universidade de Santa Bárbara da

Califórnia (UCSB), e o Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) da NASA (HESS et al., 2002). O método da videografia permite o levantamento de grandes volumes de informações de alta resolução em curto espaço de tempo e a custos baixos. As características do vôo da videografia são similares as de um vôo fotogramétrico, portanto, a possibilidade da utilização das imagens e dados de videografia em algumas atividades de cartografia para avaliação de imagens e métodos de sensoriamento remoto mostrou-se satisfatória. O sistema de videografia utilizado foi composto basicamente pelos seguintes equipamentos: câmera de vídeo digital com lentes telefoto (*zoom angle*); câmera de vídeo digital com lentes grande angular (*wide-angle*); receptor GPS com 12 canais operando em modo diferencial de tempo real; sistema inercial para determinação da atitude do avião (INS); perfilador laser altímetro (LIDAR); gerador de código de tempo; gravador de código de tempo; e gravadores de vídeo digital.

No presente trabalho são utilizados dados de coordenadas tridimensionais do perfilador LIDAR. Estes dados foram submetidos a tratamentos preliminares de filtragem para eliminação de pontos com erros grosseiros decorrentes de falhas no sistema e algumas calibrações para eliminar deslocamentos sistemáticos em altura. Os dados foram calibrados usando pontos da estrutura de controle localizados próximos às linhas de varredura (TIMBÓ ELMIRO et al., 2006). A Figura 3.23-a mostra em amarelo a localização da totalidade das linhas de varredura a laser dentro da área de estudo. A Figura 3.23-b mostra a localização geográfica de nove áreas selecionadas dos perfis LIDAR usadas na avaliação dessa fase do trabalho. Na cor vermelha (Figura 3.23-b), são mostradas as áreas com predominância de solos descobertos e vegetação baixa, em azul, áreas em vários estagios sucessionais intercalados com áreas de florestas degradadas e em verde, áreas de florestas densas.

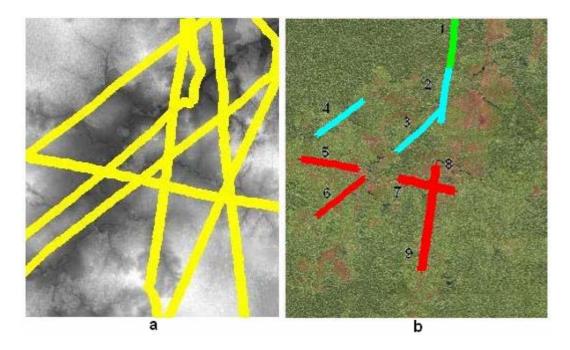


Figura 3.23 – Localização dos perfis LIDAR: (a) perfis dentro da área do MDE, (b)

Perfis usados na avaliação dos MDEs corrigidos.

Os dados originais de coordenadas 3D obtidos pelo perfilador LIDAR apresentam espaçamento horizontal de aproximadamente 30 cm e representam centenas de milhares de pontos amostrais, portanto, foi necessário filtrar os dados originais para selecionar os pontos amostrais apropriadas para uso nesta fase de avaliação, com espaçamento adequado entre pontos. Devido às características de alta freqüência dos pulsos e ao estreito IFOV do sensor, que proporciona resolução muito alta com capacidade de penetração de pulsos estreitos nos buracos das copas das árvores da floresta, os dados de perfilamento LIDAR, mediante aos processamentos adequados, são potencialmente capazes de fornecer respostas do topo e do chão da floresta (DRAKE et al., 2002; WEHR e LOHR, 1999). Para fazer uso dessas capacidades potenciais do LIDAR, visando auxiliar na avaliação dos modelos InSAR, foram desenvolvidos processamentos de filtragens baseados na identificação dos valores de máximos e mínimos dos perfis LIDAR. Os máximos resultantes representam as alturas dos topos da cobertura e os mínimos representam as alturas do chão. Os algoritmos são baseados em janelas de pesquisa que percorrem os dados de varredura para identificação de máximos e mínimos. Os valores são comparados com dados InSAR da banda X e da banda P para eliminação de erros grosseiros e depois sobrepostos às imagens da videografia de alta resolução para

para confirmação, por métodos de interpretação, se pertencem aos topos das árvores e ao chão. Os resultados numéricos e discussões dessa fase de avaliação são analisados no Capítulo 4. Outros detalhes sobre os procedimentos de filtragens dos perfis LIDAR podem ser obtidos em Timbó Elmiro et al. (2006).

#### 3.6.3 – Avaliação dos MDEs com base em critérios cartográficos

Os MDEs corrigidos foram também avaliados segundo padrões cartográficos vigentes e aceitos, estabelecidos em Normas Técnicas da Cartografia Nacional (NTCN) (BRASIL, 1984 - Decreto Lei 89817 de 1984). Medidas extraídas de produtos cartográficos estão sujeitas a, pelo menos, dois tipos de imprecisões bem caracterizadas. O erro gráfico que é, geralmente, aceito como o valor de 0.2 mm, correspondente, aproximadamente, ao limite da acuidade visual humana, e o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) o qual é o indicador de dispersão relativo a 90% de probabilidade que define a exatidão de trabalhos destinados a aplicações cartográficas.

No Brasil, o Decreto Lei 89.817, de 20/07/1984 que trata das instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (NTCN) estabelece uma classificação para documentos cartográficos com base no PEC. A Tabela 3.7 apresenta um resumo dos valores de PEC, RMSE e a classe dos produtos cartográficos estabelecidos pelas NTCN. Maiores detalhes dessas normas estão no Anexo A.

Tabela 3.7 – Classificação de produtos cartográficos segundo o Decreto Lei 89.817.

Avaliadores de	Classe A	Classe B	Classe C	
Dispersão				
PEC	PEC 0,5 mm		1 mm	
Planimétrico				
Erro padrão	0,3 mm	0,5 mm	0,6 mm	
(RMSE)				
PEC Altimétrico	½ da eqüidistância	3/5 da eqüidistância	3/4 da eqüidistância	
	das curvas de níveis	das curvas de níveis	das curvas de níveis	
Erro padrão	1/3 da eqüidistância	2/5 da eqüidistância	½ da eqüidistância	
(RMSE)	das curvas de níveis	das curvas de níveis	das curvas de níveis	

Como o valor associado ao nível de confiança de 90% prescrito no PEC corresponde a 1.6449 (abscissa da curva de distribuição normal para 90% de probabilidade) o PEC é

dado por 1.6449 x RMSE. O Artigo 10 do Decreto Lei 89.817, de 20/07/1984 estabelece que seja obrigatória a indicação da classe do produto cartográfico no rodapé do documento, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação. Todos os produtos cartográficos para fins de mapeamentos sistemáticos, tal como as séries de cartas topográficas do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) ou seus equivalentes, procuram atingir o padrão classe "A". Portanto, segundo o PEC planimétrico, qualquer informação de posição obtida em um documento cartográfico classe "A" estará sujeita a uma composição de incertezas de 0.2 mm na sua identificação e 0,5 mm na sua posição geográfica.

Em um produto de mapeamento de escala 1:25.000, por exemplo, as incertezas planimétricas seriam 5 m e 12.5 m, respectivamente. De modo similar, as medidas altimétricas estão sujeitas ao PEC altimétrico que é de meia equidistância das curvas de níveis para produtos de mapeamento classe "A". Um produto cartográfico de escala 1:25.000 (com 10 m de equidistância vertical das curvas de níveis) teria uma incerteza altimétrica de 5 m. As diversas normas técnicas relacionadas à cartografia nacional seguem de perto essas linhas gerais, portanto, o método de análise da compatibilidade cartográfica dos MDEs corrigidos foi conduzido dentro desses paradigmas e as discussões apropriadas com base nos resultados são apresentadas no Capítulo 4.

#### 3.7 – Extração de informações de alturas da floresta derivadas dos MDEs

Os MDEs corrigidos pelos métodos propostos foram usados em aplicações que produzem informações derivadas de análises de modelos de elevação. Uma das aplicações importantes para a linha de pesquisa e objetivos do trabalho de tese é o cálculo do modelo diferença (MDE X - MDE P), que representa o modelo digital de alturas da floresta (MDA). O MDA é um produto derivado de análises de MDE InSAR que pode ser usado para vários propósitos científicos e técnicos, incluindo a estimativa de biomassa em grandes extensões territoriais do planeta. Sua utilização como informação auxiliar para a classificação e mapeamento da cobertura do solo, para aplicações gerais de engenharia florestal e ambiental, são de interesse para pesquisadores que atuam no mapeamento de recursos da Terra. O MDA da floresta foi calculado após cada um dos modelos digitais de elevação da banda P e da banda X ter sido corrigido individualmente

pelos diferentes métodos apresentados. Foi selecionado o melhor método para correção da banda X e o melhor método para correção da banda P, com base nas análises das tabelas, figuras e discussões apresentadas. Os dois modelos corrigidos pelos dois melhores métodos escolhidos foram, então, usados para gerar o MDA da floresta. Os resultados e discussões relativos a essa fase da metodologia de trabalho são analisados no Capítulo 4.

# 3.8 – Derivação da biomassa da floresta usando o MDA e $\sigma^0_{HH}$ da banda P

A área de trabalho da Floresta Nacional de Tapajós (FLONA Tapajós) tem sido, desde a década passada, um grande laboratório de campo para pesquisas científicas nas áreas de cartografia, meio ambiente e estudos florestais. Diversos tipos de dados coletados, processados e produzidos em pesquisas relacionadas à região da FLONA Tapajós resultaram de atuação integrada da equipe multidisciplinar de pesquisadores na qual este trabalho de pesquisa de tese está inserido.

Outra aplicação utilizando dados derivados dos MDEs aqui corrigidos, importante para os objetivos da linha de pesquisa como um todo, consistiu na extração de informações da biomassa acima do nível do solo usando os dados do MDA, de modo a aperfeiçoar os mapas regionais de biomassa anteriormente desenvolvidos no âmbito da equipe de pesquisa. Em trabalho realizado por Santos et al. (2003), o estoque de biomassa aérea de florestas primárias e secundárias da região de estudo na Floresta Nacional de Tapajós foi relacionado de forma logarítmica com dados de retroespalhamento (*backscatter*) da banda P em polarização HH ( $\sigma^{\circ}_{HH}$ ), apresentando uma saturação para valores em torno de 100 ton/ha. Além disso, nesses estudos, os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) encontrados foram considerados não satisfatórios. Segundo Santos et al. (2002) a saturação do retroespalhamento para os níveis elevados de biomassa é um problema geral da floresta tropical ao ser monitorada com imagens de radar. Grandes diferenças em biomassa não são acompanhadas por diferenças significativas em valores para o retroespalhamento do radar, caracterizando assim, saturação da intensidade do radar.

Neeff et al. (2005) desenvolveu uma relação linearizada entre a biomassa e a altura interferométrica com a inserção simultânea da variável retroespalhamento ( $\sigma^{\circ}_{HH}$ ) na

modelagem. A melhoria do modelo aumentou substancialmente os valores de coeficientes de determinação, atingindo níveis bastante satisfatórios. Este modelo de biomassa é dado pela Equação 3.17

$$biomassa = 44.965 + 13.87h_{int} + 10.566 \,\sigma^{0}_{HH} \tag{3.17}$$

onde  $h_{int}$  é a altura interferométrica obtida a partir de calibrações locais nos transectos de interesse e  $\sigma^0_{HH}$  é o retorno da intensidade do sinal radar em banda P com polarização HH nos mesmos transectos. Este modelo foi estabelecido para todas as fisionomias estudadas na área de Tapajós, desde a sucessão secundária (capoeira) de estágio inicial com biomassa de 5 ton/ha, até a floresta primária com níveis de 350 ton/ha.

Não obstante a obtenção da Equação 3.17, não foi possível obter a estimativa de biomassa para a região da FLONA de Tapajós, como um todo, por causa da baixa qualidade do MDA existente até então. Utilizando o MDA corrigido, segundo a metodologia apresentada, e a imagem HH calibrada radiometricamente, foi então possível obter o mapa de biomassa para a região da FLONA Tapajós conforme apresentado na Figura 3.24-a. Na Figura 3.24-b é apresentado o modelo de alturas interferométricas (MDA), ambos na forma de imagem de tons de cinza.

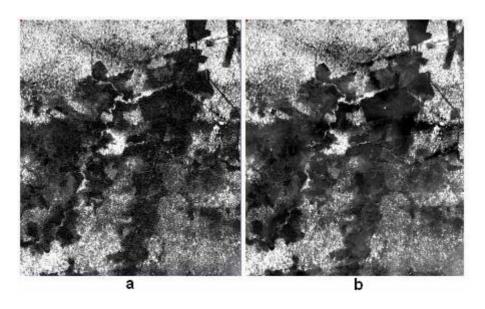


Figura 3.24 – Imagens em tons de cinza da (a) biomassa e (b) de alturas interferométricas.

Os resultados obtidos nessa fase da pesquisa se mostraram dentro de limites compatíveis com valores encontrados em outros trabalhos de pesquisas (LAURANCE et al., 1999; NASCIMENTO e LAURANCE, 2002; CASTILHO, 2004; PINHEIRO et al., 2007). Estes dados são apresentados, discutidos e analisados com os detalhes apropriados no Capítulo 4.

## **CAPÍTULO 4**

# ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos através da aplicação dos métodos discutidos nos tópicos do Capítulo 3, acompanhados das discussões e análises relativas a cada etapa de trabalho. Estas análises e discussões de resultados forneceram as bases para inferências e consolidação das conclusões do trabalho de pesquisa.

# 4.1. Testes estatísticos de igualdade de variâncias dos MDE corrigidos

Os melhores MDE corrigidos foram escolhidos com base na comparação de estatísticas de valores de RMSE que indicam a precisão ou dispersão das correções e são, essencialmente, medidas de desvio padrão. Assim foi necessário testar se os valores de RMSE muito próximos são estatisticamente diferentes. Os testes foram feitos no nível de significância ( $\alpha$ ) de 0.05, correspondente a uma confiança (1- $\alpha$ ) de 95%.

 $RMSE_1^2/RMSE_2^2$  tem uma distribuição  $F(n_1-1, n_2-1)$ , assim as hipóteses testadas são:

- 1) Variâncias iguais:  $RMSE_1^2 = RMSE_2^2$  se  $F(\alpha/2; n_1-1, n_2-1) \le (RMSE_1^2 / RMSE_2^2)$  $\le F(1-\alpha/2; n_1-1, n_2-1)$
- 2) Variâncias diferentes:  $RMSE_1^2 \neq RMSE_2^2$  se não  $[F(\alpha/2; n_1-1, n_2-1) \leq (RMSE_1^2/RMSE_2^2) \leq F(1-\alpha/2; n_1-1, n_2-1)]$

Onde  $n_i$  é o número de pontos da amostra i. Considerando o teste de hipóteses para os arranjos 1 e 2 do método IQD, com o MDE da banda P, resultou na expressão: (F(0.25; 620, 421) = 1)  $\leq$  ((1.744) $^2$ /(1.694) $^2$  = 1.06)  $\leq$  (F(0.975; 620, 421) = 1) cujo resultado é falso, implicando na hipótese 2, com variâncias diferentes para estes dois MDE.

Todos os métodos e arranjos foram testados dessa mesma forma, dois a dois, por bandas P e X separadamente e os testes mostraram que as variâncias são todas diferentes no nível de significância de 5% (explicado pelos grandes tamanhos das amostras, n > 400). Portanto, os melhores modelos corrigidos são os de menor valor de RMSE. O melhor MDE da banda P foi o modelo corrigido pelo arranjo 1 do método do IQD e o melhor

MDE da banda X foi o modelo corrigido pelo arranjo 1 do método da triangulação com interpolação linear. A hipótese estatística da igualdade de variâncias para estes dois modelos que é dada pela expressão:  $(F(0.25; 421, 421) = 1) \le ((1.694)^2/(1.590)^2 = 1.135)$   $\le (F(0.975; 421, 421) = 1)$ , também resultou falsa implicando que estes dois MDEs são estatisticamente diferentes.

#### 4.2 Testes estatísticos de igualdade de médias dos MDE corrigidos

As médias das correções, que representam medidas de tendência central, podem ser usadas como indicadores de exatidão dos MDE corrigidos. Testes estatísticos foram feitos no nível de significância ( $\alpha$ ) de 0.05, correspondente a uma confiança (1- $\alpha$ ) de 95%, para verificar se médias de superfícies de correções muito próximas são estatisticamente diferentes.

A diferença das médias tem uma distribuição  $t(n_1+n_2-2)$ , assim as hipóteses testadas são:

- 1) Médias iguais: MEDIA<sub>1</sub> = MEDIA<sub>2</sub> se -t(1- $\alpha$ /2;  $n_1+n_2$ -2) $s \le$  (MEDIA<sub>1</sub> MEDIA<sub>2</sub>)  $\le$  t(1- $\alpha$ /2;  $n_1+n_2$ -2)s
- 2) Médias diferentes: MEDIA<sub>1</sub>  $\neq$  MEDIA<sub>2</sub> se não -t(1- $\alpha$ /2;  $n_1+n_2$ -2) $s \leq$  (MEDIA<sub>1</sub> MEDIA<sub>2</sub>)  $\leq$  t(1- $\alpha$ /2;  $n_1+n_2$ -2)s

Onde  $n_i$  é o número de pontos da amostra i e s é o desvio padrão da diferença das médias. Considerando o teste de hipóteses para os arranjos 1 e 2 do método IQD, com o MDE banda P, resultou na expressão:  $(-t(0.975; 1039)x0.1 = -0.2) \le (-0.062-(-0.137) = 0.075 \le (t(0.975; 1039)x0.1 = 0.2)$  cujo resultado é verdadeiro implicando na hipótese 1, com médias iguais para estes dois MDEs. Todos os métodos e arranjos foram testados dessa mesma forma, dois a dois, por bandas P e X separadamente e os resultados mostraram que, salvo poucas combinações dos arranjos 5 e 3 e 2 e 3, as médias são, na maioria, estatisticamente iguais no nível de significância de 5%. Portanto, estas médias indicaram alta exatidão das correções, mas não foram adequadas para comparação dos modelos.

#### 4.3. Análise qualitativa geral dos MDEs corrigidos pelos métodos propostos

O método de correção de MDE através de uma superfície de offset vertical é, por sua própria natureza, um ajuste simplificado que representa o menor custo computacional e o menor esforço geral dentre todos os métodos testados. Porém, devido à maneira completamente uniforme de fazer a compensação de erros, não permitindo deslocamento relativo entre feições (Figura 3.16 e Equação 3.7), este método é o menos adequado para o tratamento de erros desiguais, localizados em diferentes posições geográficas. Os outros quatro métodos mostraram-se mais apropriados do que o método do offset para o tratamento desses tipos de erros dos MDEs, de características tipicamente locais. Isto se deve ao maior grau de elasticidade associado à natureza das funções matemáticas embutidas nesses métodos de correção que permite deslocamentos relativos entre as feições. Comparado com o método similar de correção por deslocamento vertical aplicado por Dutra et al. (2002), o método de offset apresentou pequenas diferenças nas médias (296 mm para a banda P e 363 mm para a banda X no arranjo 1), mostrando que o MDE de Dutra et al. (2002) já estava deslocado verticalmente para valores próximos da realidade geográfica. Os RMSE foram praticamente os mesmos e os máximos e mínimos sofreram apenas pequenos offsets, pois não houve deslocamento relativo entre feições, exceto devido a alguns *outliers* tratados (Tabelas 3.2, 4.1, 4.4 e 4.5). A Tabela 4.1 mostra parâmetros estatísticos indicadores da qualidade extraídos dos MDEs corrigidos pelo método do deslocamento vertical aplicado por Dutra et al. (2002). Foram usados os mesmos dados de teste com os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle definidos na Seção 3.5.3. As unidades de medidas usada na tabela são expressas em metros.

Tabela 4.1 – Indicadores numéricos da qualidade dos MDEs corrigidos pelo método do deslocamento vertical aplicado por Dutra et al. (2002) para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
	1	-8.097	7.565	0.213	2.567	3.130
	2	-8.057	7.469	0.114	3.078	3.780
P	3	-8.140	7.584	0.296	2.481	3.085
	4	-8.090	7.539	0.168	2.857	3.607
	5	-7.930	7.374	0.043	3.105	3.930
	1	-6.051	8.730	-0.297	2.301	2.968
	2	-6.000	8.579	-0.190	3.774	3.378
X	3	-6.175	8.855	-0.363	2.378	2.959
	4	-6.016	8.693	-0.241	2.643	3.337
	5	-5.992	8.572	-0.125	2.818	3.526

No método de correção por triangulação com interpolação linear, conforme pode ser observado na análise da Figura 3.17, os erros dos pontos do MDE foram corrigidos com influência da vizinhança local, restrita a apenas três amostras correspondentes aos vértices da triangulação de Delaunay. Assim, a superfície de correção resultante se apresenta multifacetada, com arestas bem acentuadas entre as regiões triangulares individuais. Apesar dos remendos triangulares, que provocam uma quebra do gradiente nas arestas e fornecem uma suavização aparentemente pouco adequada na transição das regiões vizinhas, foi garantida a continuidade global da superfície. Este método apresentou, dentre todos que foram testados, os parâmetros numéricos globais de resultados mais favoráveis para correção do MDE da banda X, pois os mínimos, máximos e RMSE relativos a este método apresentados nas Tabelas 3.3, 4.4 e 4.5 foram melhores do que os indicadores relativos aos outros métodos. Portanto, foi escolhido como melhor método para correção do MDE da banda X em todas as outras análises subsequentes deste trabalho. Os MDEs corrigidos por este método apresentaram indicadores estatísticos de qualidade superior aos modelos corrigidos pelo método de triangulação com buffer de transição aplicado por Moura (2005), como mostram os dados das Tabelas 3.3, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. A Tabela 4.2 mostra parâmetros estatísticos indicadores da qualidade extraídos dos MDEs corrigidos pelo método da triangulação com buffer de transição aplicado por Moura (2005). Foram usados os mesmos dados de teste com os cinco arranjos da estrutura de pontos de controle definidos na Seção 3.5.3. Todas as unidades de medidas usadas na tabela são expressas em metros.

Tabela 4.2 – Indicadores numéricos da qualidade dos MDEs corrigidos pelo método da triangulação com *buffer* de transição aplicado por Moura (2005) para dados de teste relativos aos cinco arranjos de pontos de controle.

MDE	Arranjo	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
	1	-5.077	5.395	0.231	1.881	2.330
	2	-5.593	5.376	0.127	1.998	2.391
P	3	-2.951	3.412	0.318	1.007	1.356
	4	-4.305	6.479	0.184	1.940	2.363
	5	-5.443	6.426	0.053	2.002	2.413
	1	-3.641	2.784	0.306	1.691	2.145
	2	-4.824	3.301	0.418	1.792	2.285
X	3	-2.855	3.132	0.237	0.996	1.311
	4	-4.708	3.100	0.364	1.785	2.281
	5	-6.324	3.301	0.485	2.004	2.423

O método de correção pelo inverso do quadrado da distância proporcionou uma transição geral mais suavizada que o método da triangulação. A análise das superfícies de correção representadas na Figura 3.18 mostra que a influência da vizinhança local se estendeu por vários pontos de amostras, sendo que as de maior proximidade tiveram influência muito maior. O método do IQD mostrou-se apropriado para correção dos erros de variáveis naturais, como o relevo da superfície terrestre, onde está embutida a primeira lei de Tobler que trata da proximidade geográfica (MILLER, 2004). O custo computacional, em termos de tempo de processamento, do IQD é elevado em comparação com a triangulação seguida de interpolação linear. Este método apresentou, dentre todos testados, os resultados globais de melhor qualidade para correção do MDE da banda P, conforme análise geral das Tabelas 3.4, 4.4 e 4.5, portanto, foi escolhido como o melhor método para correção do MDE da banda P nas demais análises subseqüentes deste trabalho.

O método de correção por *splines*, conforme análise das superfícies representadas na Figura 3.19, proporcionou uma suavização global mais acentuada para a superfície de correção do que os métodos IQD e triangulação. Garantiu uma junção contínua e também suavizada entre as partes locais da superfície de correção, porém, apresentou alguns problemas de exageros dos valores estimados no caso de pontos de amostra com maiores variações verticais dentro de um curto espaço horizontal. Isto resultou na introdução de

máximos e mínimos mais elevados do que nos outros métodos (Tabelas 3.5, 4.4 e 4.5). Seu custo computacional geral é elevado quando comparado aos métodos do IQD e da triangulação.

O método da krigagem apresentou resultados numéricos gerais superiores ao método de *splines* e um pouco inferiores aos métodos de triangulação e do IQD, indicado pela análise geral dos resultados numéricos das Tabelas 3.3 a 3.6, 4.4 e 4.5. Pelo fato dos dados necessitarem ser processados duas vezes, uma vez para estimar a autocorrelação espacial entre eles e depois para calcular os valores interpolados, a krigagem apresentou custo computacional mais elevado, superior a todos os outros métodos de correção.

Embora os métodos de krigagem e splines tenham apresentado bons desempenhos, não produziram os melhores resultados dentre todos testados, mesmo sendo métodos baseados em funções mais elaboradas do que os demais. Algumas razões possíveis para esse desempenho apenas regular em relação ao IQD e à triangulação são comentadas a seguir. Devido à grande quantidade de pontos de controle utilizados todos os métodos tendem a produzir resultados similares (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Neste caso particular dos MDEs da FLONA Tapajós, apesar do grande número de pontos, a distribuição foi limitada pela presença da floresta. Como a triangulação e o IQD são interpoladores exatos, onde os valores estimados coincidentes com posições de amostras de treinamento são idênticos a estas, eles podem ter sido privilegiados por fatores locais. Apesar das amostras de teste e de treinamento formarem conjuntos separados, elas pertencem a vizinhanças próximas, neste caso, pontos de teste muito próximos de pontos de treinamento podem ter seus correspondentes interpolados com valores similares gerando erros muito pequenos na triangulação e no IQD. No caso da triangulação, uma explicação possível para que a superfície multifacetada, formada por elementos finitos, tenha fornecido melhores resultados que outras superfícies mais elaboradas pode ter amparo na amostragem dos pontos de controle do terreno que procurou seguir o processo de captura de dados em situação ideal. Ou seja, os vértices dos triângulos coincidiram com pontos notáveis do terreno (picos, depressões, pontos de inflexão e linhas de descontinuidades) e as arestas percorreram feições lineares como fundos de vales, drenagens, cristas, cumeadas e divisores de águas de forma que cada aresta representa uma porção de declividade uniforme da feição no terreno. Assim, é natural que a

modelagem dos erros relativos a essas feições também obedeça a essa disposição, justificando o melhor resultado para a correção da banda X.

Segundo Burrough e McDonnell (1998) a krigagem é um método teoricamente superior aos demais, pois não trata ruídos como parte dos dados. Seu uso é recomendando quando a variação do atributo modelado é muito irregular e a densidade de amostras é inadequada para ser modelada por métodos comuns. Como não foram obtidos resultados superiores aos demais métodos, isto pode mostrar que não houve tendências direcionais ou autocorrelação significativa nas amostras de erros modelados pela superfície de correção ou, ainda, uma modelagem inadequada da função variograma.

Quanto às splines foram relatados casos de problemas quando há grandes variações verticais em curto espaço horizontal (CACHIER et al., 2003; NUSS e TITLEY, 1994). Esta situação pode ter ocorrido em algumas amostras muito adensadas nas pequenas áreas de clareiras nos MDEs da FLONA Tapajós. As splines não são interpoladores exatos que se baseiam em uma função de aproximação que procura passar o mais próximo possível das amostras e ao mesmo tempo busca produzir uma superfície que seja a mais suavizada possível. Isto pode ter gerado algumas estimativas exageradas nos pontos de teste correspondentes. A superfície interpolada pode ter sido gerada com alguns pontos de inflexão não coincidentes com pontos de amostras gerando máximos e mínimos estimados não coincidentes com pontos de dados, podendo ser, também, uma fonte de erros. As splines podem produzir uma visão da realidade exageradamente suavizada, parecendo produzir a superfície de aparência mais natural. Entretanto, isso pode ser apenas um reflexo das preferências culturais humanas, pois as superfícies podem ter sido suavizadas em grau muito maior do que a realidade, introduzindo artifícios nos modelos. Alguns problemas dessa natureza foram reportados na literatura com interpolação por splines (AUDETTE et al., 2000; BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

#### 4.3.1. Resultados Globais.

Embora, os indicadores estatísticos da fase de treinamento forneçam medidas importantes para aferição da qualidade dos MDEs, os indicadores de testes são mais

representativos para análise de resultados. As estatísticas dos dados de teste são baseadas em um conjunto de pontos de controle independentes, ou seja, pontos que não participaram do cálculo das superfícies de correção, assim, não incorporam artifícios ou estimativas tendenciosas. Para a avaliação quantitativa dos métodos de correção implementados, foram utilizadas as estatísticas numéricas apresentadas nas Tabelas 3.2 a 3.6, resultantes dos pontos de controle para testes. De um modo geral, a partir da análise quantitativa destes dados, observou-se que todos os métodos de correção apresentaram bons resultados numéricos globais, pois não houve variações exageradas nas medidas estatísticas, entretanto foi possível estabelecer uma ordem de qualidade e precisão entre eles.

Os erros globais existentes nos MDEs são aqueles relacionados com a exatidão vertical geral e representam a incerteza na altitude de um ponto causada pela presença de erros aleatórios e sistemáticos não corrigidos que já foram discutidos nos Capítulos anteriores. A medida global mais comumente aceita para exatidão vertical é a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), definida na Equação 2.7, que foi obtida através da comparação dos pontos de teste de campo com seus correspondentes localizados nos modelos digitais de elevação corrigidos. Os erros individuais foram obtidos calculando-se as diferenças entre valores de pontos de controle e valores correspondentes no MDE. O resumo das estatísticas globais para todos os métodos estudados, com seus cinco diferentes arranjos de pontos de controle, está apresentado nas Tabelas 3.2 a 3.6.

Analisando os resultados apresentados nestas tabelas, observa-se que o arranjo do tipo 3 apresenta os melhores indicadores seguido do arranjo do tipo 1 que é pouco melhor que o arranjo 4, embora os resultados para ambos sejam muito parecidos. Os arranjos tipo 2 mostram pequena vantagem sobre os arranjos tipo 5, sendo ambos muito similares, apresentando os indicadores menos favoráveis dentre todos. Estes resultados confirmam um conceito geral aceito na prática de correções geométricas de dados de sensoriamento remoto, onde quanto maior for o número de pontos de controle e melhor a distribuição espacial, melhores os resultados esperados (LILLESAND e KIEFER, 1999).

A Tabela 4.3 mostra os valores indicadores da qualidade média de todos os métodos de correção, obtidos pela extração da média aritmética simples dos arranjos tipo 1 ao tipo 5

(Tabelas 3.2 a 3.6) para as duas bandas P e X. A análise desta síntese apresentada na Tabela 4.3 confirma a observação anteriormente apresentada de que o IQD foi o melhor método para correção da banda P (RMSE: 1.390) e a triangulação foi o melhor método para correção da banda X (RMSE: 1.322).

Tabela 4.3 – Indicadores médios da qualidade da correção dos MDEs pelos cinco métodos.

MDE	Método	Mínimo	Máximo	Média	MAE	RMSE
	OFFSET	-7.961	6.867	-0.129	2.736	3.427
Banda	TRI	-3.093	3.549	-0.104	1.237	1.533
P	IQD	-2.812	3.227	-0.097	1.145	1.390
	TPS	-3.515	4.034	-0.123	1.430	1.776
	KRIG	-3.234	3.711	-0.117	1.307	1.597
	OFFSET	-6.041	7.990	0.120	2.559	3.174
Banda	TRI	-2.690	1.728	0.090	1.033	1.322
X	IQD	-2.958	1.901	0.096	1.162	1.472
	TPS	-3.362	2.161	0.114	1.339	1.686
	KRIG	-3.093	1.988	0.108	1.217	1.537

Os dados das Tabelas 3.2 a 3.6 e 4.3 também indicam que a banda X apresentou resultados gerais um pouco melhores que a banda P na maioria dos arranjos testados. Este resultado pode ser explicado devido à maior coerência da banda X em relação à banda P em áreas pouco rugosas, o que resulta em mais ruídos na geração do MDE da banda P do que no MDE da banda X nestes tipos de áreas (GAMA, 2007). Os pontos de controle usados nessa fase de avaliação foram medidos em áreas de pastagens ou sem cobertura vegetal que apresentam baixa rugosidade.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam uma súmula dos resultados numéricos de avaliação (mínimos, máximos, média, MAE e RMSE) para os MDEs da P e da banda X, respectivamente. Os dados foram extraídos das Tabelas 3.2 a 3.6, relativos aos arranjos que forneceram os melhores resultados em termos de média e desvio padrão para cada um dos cinco métodos de correção. Os resultados de avaliação dos MDEs corrigidos por Dutra et al. (2002) e Moura (2005) foram extraídos das tabelas 4.1 e 4.2. O arranjo tipo 3 foi considerado o mais adequado para correção dos MDEs, pois utilizou todos os pontos disponíveis fornecendo os melhores indicadores, entretanto este arranjo não deve ser

usado para comparação devido ao RMSE correspondente não ser resultante de pontos independentes. Assim, o melhor arranjo escolhido para comparação com os modelos originais foi o tipo 1 que usou 2/3 dos pontos para treinamento e 1/3 para teste.

Tabela 4.4 – Resumo de indicadores da qualidade global da correção do MDE da banda P.

MDE	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
Dutra	-8.097	7.565	0.213	2.567	3.130
Moura	-5.077	5.395	0.231	1.881	2.330
OFFSET	-7.993	6.923	-0.083	2.413	3.068
TRI	-3.723	3.956	-0.066	1.405	1.864
IQD	-3.385	3.597	-0.062	1.368	1.694
TPS	-4.231	4.496	-0.079	1.710	2.118
KRIG	-3.892	4.136	-0.075	1.573	1.949

Tabela 4.5 – Resumo de indicadores da qualidade global da correção do MDE da banda X.

	I	I			
MDE	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
Dutra	-6.051	8.730	-0.297	2.301	2.968
Moura	-3.641	2.784	0.306	1.691	2.145
OFFSET	-6.045	8.032	0.066	2.359	2.910
TRI	-2.427	1.856	0.050	1.230	1.560
IQD	-2.670	2.041	0.053	1.353	1.743
TPS	-3.034	2.320	0.063	1.538	1.950
KRIG	-2.791	2.134	0.059	1.415	1.794

A análise dos parâmetros numéricos das Tabelas 4.4 e 4.5 também indicam as observações anteriores de que o método do inverso do quadrado da distância foi o mais adequado para corrigir o MDE da banda P (RMSE: 1.694) e o método da triangulação com interpolação linear foi a melhor opção para corrigir o MDE da banda X (RMSE: 1.560). Para esta conclusão de avaliação numérica global, considerou-se o RMSE como fator de maior peso, porém utilizou-se também o MAE, os máximos e os mínimos como fatores secundários. As Tabelas 4.4 e 4.5 mostram, ainda, que os métodos implementados na pesquisa de tese apresentam resultados gerais melhores que os métodos de Dutra et al. (2002) e Moura (2005). A Figura 4.1 mostra as imagens de tons de cinza dos MDEs, da banda P (Figura 4.1-a) e da banda X (Figura 4.1-b), corrigidos respectivamente pelo método do IQD e pelo método da triangulação com interpolação linear.

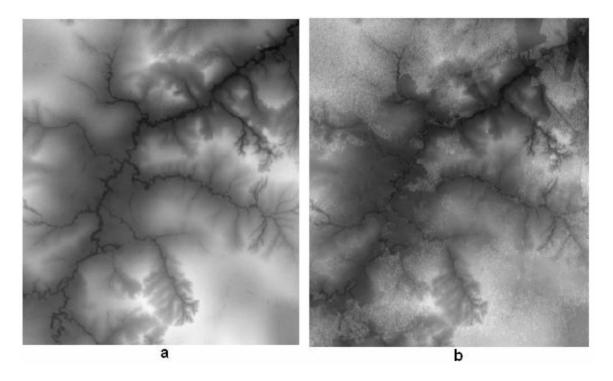


Figura 4.1 – MDEs corrigidos: (a) banda P ajustado pelo método do IQD e (b) banda X ajustado por triangulação com interpolação linear.

A Figura 4.2 mostra o MDE banda P por meio de representações de relevo sombreado que realçam os aspectos tridimensionais do terreno. O terreno é tratado como se fosse um sólido feito de material com rugosidade ideal, iluminado a partir de um certo ponto de vista, a um ângulo de elevação acima do horizonte e um azimute com a direção Norte. O resultado final tem aspecto parecido com o de uma foto aérea com aspectos do relevo realçado. Nas Figuras 4.2-a, 4.2-b e 4.2-c são mostrados mapas de relevo sombreados em tons de cinza, em cores variando do azul (menos elevados) ao vermelho (mais elevados) e nas cores do Arcoiris, respectivamente.

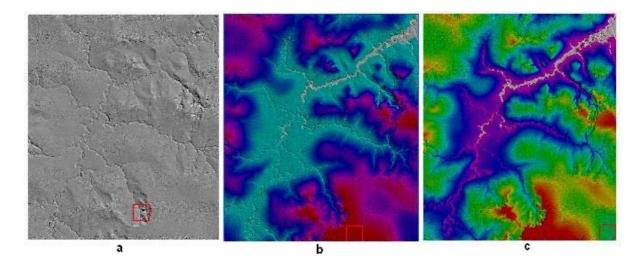


Figura 4.2 – Produtos de relevo sombreado extraídos do MDE banda P corrigido pelo método do IQD: (a) em tons de cinza, (b) em cores variando do azul (menos elevados) ao vermelho (mais elevados) e (c) nas cores do Arcoiris.

As Figuras 4.3-a e 4.3-c mostram os MDEs corrigidos, ilustrados nas Figuras 4.1-a e 4.1b, com sobreposição de curvas de níveis de 10 metros de equidistância vertical. A geração de curvas de níveis a partir dos próprios modelos é um dos tipos de aplicação de análises derivadas de MDE para extração de informações topográficas. Para cada MDE são mostrados detalhes ampliados de um pequeno trecho na vizinhança de um canal de drenagem, que são ilustrados nas Figuras 4.3-b e 4.3-d correspondentes, respectivamente, à banda P e à banda X. Os detalhes ampliados na figura referem-se a uma área onde predominam pastagens e regenerações, portanto, as curvas de níveis apresentam aparências relativamente similares em ambos os modelos. Entretanto, as pequenas diferenças são justamente devidas às presenças dessas fisionomias vegetais. Pode-se observar que a curva de nível de altitude igual a 70 metros na banda P (Figura 4.3-b) prossegue pela superfície das duas margens do canal na direção da nascente, enquanto na banda X (Figura 4.3-d) essa curva retorna antes cruzando o talvegue, indicando representar uma superfície com cobertura vegetal em nível mais alto que na banda P. Observa-se, também, na Figura 4.3 que as curvas de níveis da banda P são mais suavizadas caracterizando o chão, enquanto na banda X apresentam rugosidade característica da vegetação.

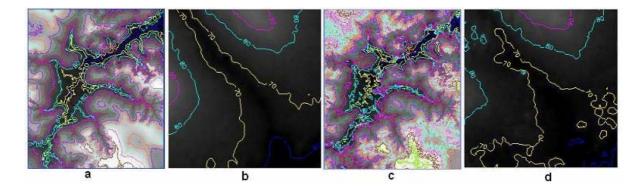


Figura 4.3 – MDEs corrigidos com as curvas de níveis derivadas dos próprios modelos:

(a) banda P, (b) detalhe ampliado banda P, (c) banda X e (d) detalhe ampliado banda X.

A drenagem foi extraída do MDE banda P antes e depois da aplicação dos métodos de correção para servir como uma estrutura natural de pontos de controle de teste. Os métodos de extração e análise de drenagem em MDEs são baseados em algoritmos que analisam a vizinhança. Em uma vizinhança da superfície curva do MDE, a menor distância entre um ponto qualquer e o ponto mais baixo é a linha de máximo declive. Devido a buracos e depressões espúrias na superfície digital causadas por ruídos, problemas na quantização ou erros de arredondamentos, ocorrem interrupções de fluxo na linha de máximo declive, resultando padrões incoerentes na rede de drenagem como os que são mostradas na Figuras 4.4-a, 4.4-b e 4.4-c. As correções aplicadas não resolveram completamente estes tipos de problemas, porém contribuíram para uma redução do total de interupções nos fluxos de drenagem, nos tamanhos dos intervalos de interrupção e na redução de buracos na superfície digital do MDE. Após a aplicação das correções aumentou a coerência dos padrões de drenagem extraídos do MDE, como pode ser visto nos trechos das Figuras 4.4-d, 4.4-e e 4.4-f que correspondem aos trechos do MDE original mostrados nas Figuras 4.4-a, 4.4-b e 4.4-c. Não é muito trivial tratar buracos depressões e outros ruídos durante a extração da rede de drenagem, portanto, antes de fazer tentativas de análise estrutural, o melhor é fazer um pré-processamento no MDE para remoção de buracos e outros ruídos.

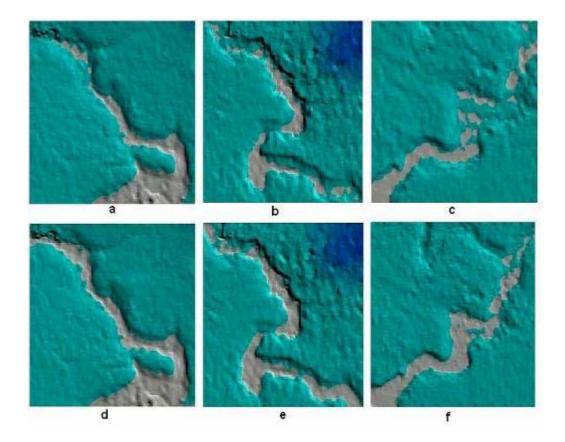


Figura 4.4 – Trechos da drenagem no MDE original (a, b, c) com interupções e os correspondentes no MDE corrigido (d, e, f) com melhorias de fluxo.

As características naturais das redes de drenagem que percorrem as linhas de máximo declive do terreno são formas eficientes de avaliação qualitativa dos MDEs, e a melhoria da coerência apresentada nos padrões de drenagem extraídos dos MDEs corrigidos em relação aos MDEs originais é um indicador da adequação dos métodos de correção aplicados.

#### 4.3.2. Resultados Locais.

Os erros locais estão relacionados com a exatidão vertical relativa do modelo de elevação, ou seja, com a exatidão ponto a ponto definida pela incerteza na altura entre dois pontos causada por erros aleatórios e sistemáticos não corrigidos (WEYDAHL et al., 2007). Os erros locais foram avaliados através da estimação do RMSE das diferenças entre pontos de controle de campo e os seus correspondentes nos MDEs corrigidos. Como dados de controle para essa fase da avaliação foram utilizadas 15 áreas distintas,

geograficamente distribuídas nos modelos de elevação. Para cada área independente foram calculados os mínimos, máximos, média e o RMSE das diferenças. As Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 mostram os resumos dos resultados locais de avaliação nas 15 áreas obtidos, respectivamente, para os MDEs processados por Dutra et al. (2002), por Moura (2005) e por esta pesquisa de tese. Os modelos da pesquisa avaliados (Tabelas 4.8) correspondem ao MDE da banda P resultante da aplicação do método IQD e ao MDE da banda X resultante da aplicação do método da triangulação (TRI) com interpolação linear gerados pelo arranjo tipo 1 dos pontos de controle. Os dados completos referentes a estes resultados são apresentados no Apêndice A.

Tabela 4.6 – Resumo de indicadores da qualidade local do MDE de Dutra et al. (2002).

Area	Banda	P	Banda 2	X		
Local	Média	RMSE	Média	RMSE		
1	0.259	3.378	0.394	1.363		
2	_	1.845		1.218		
	0.970		0.881			
3	-	3.605		1.562		
	1.494		0.078			
4	1.523	1.622	-0.851	2.800		
5	0.892	1.109	1.900	1.038		
6	0.546	2.510	0.805	1.393		
7	-	0.951		0.862		
	0.330		1.003			
8	-	1.007		2.422		
	0.986		-0.162			
9	-	0.908		3.377		
	0.842		0.274			
10	-	0.604		1.142		
	1.100		0.206			
11	0.845	1.535	-1.019	1.594		
12	1.224	1.084	1.225	0.741		
13	-	1.068		1.275		
	1.742		-1.533			
14	0.684	1.427	0.952	0.772		
15	0.523	1.036	-1.273	0.973		

Tabela 4.7 – Resumo de indicadores da qualidade local do MDE de Moura (2005).

Area	Banda l	P	Banda	X
Local	Média	RMSE	Média	RMSE
1	0.234	3.040	0.355	1.227
2	-	1.661		1.096
	0.874		0.793	
3	-	3.245		1.406
	1.345		0.070	
4	1.371	1.460	-0.766	2.070
5	0.803	0.998	1.710	0.934
6	0.491	1.539	0.724	1.254
7	-	0.911		0.543
	0.462		1.505	
8	-	0.906		1.730
	0.888		-0.146	
9	-	0.817		2.859
	0.758		0.246	
10	-	0.655		1.028
	1.430		0.186	
11	0.760	1.202	-0.918	1.435
12	1.102	0.976	1.102	0.667
13	-	0.961		1.148
	1.567		-1.379	
14	0.616	1.284	1.238	1.004
15	0.471	0.932	-1.146	0.876

Tabela 4.8 – Resumo de indicadores da qualidade local do MDE P e X.

Area	Banda l	P – IQD	Banda 2	Banda X – TRI		
Local	Média	RMSE	Média	RMSE		
1	0.110	0.480	0.195	1.074		
2	-	0.140	-0.414	0.789		
	0.030					
3	0.120	0.620	-0.009	0.618		
4	-	1.230	-0.090	0.801		
	0.260					
5	-	1.640	-0.465	1.284		
	0.040					
6	-	0.690	-0.270	1.371		
	0.010					
7	0.070	0.180	0.045	0.141		
8	0.060	0.440	-0.147	0.843		
9	-	0.520	0.493	1.016		
	0.050					
10	0.000	1.570	0.162	0.594		
11	-	0.390	0.186	0.573		
	0.090					
12	-	0.360	0.015	0.558		
	0.010					
13	0.510	1.020	0.366	1.154		
14	0.070	0.360	0.021	0.300		
15	-	0.460	0.018	1.365		
	0.050					

Analisando as Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 pode-se observar que os métodos estudados nesta pesquisa de tese apresentam melhorias locais em relação aos modelos corrigidos por Dutra et al. (2002) e Moura (2005). Todos os indicadores estatísticos locais de avaliação da Tabela 4.8 apresentaram resultados melhores que os das tabelas 4.6 e 4.7. Aumentou a exatidão com as médias locais próximas da verdade terrestre e aumentou a precisão com a redução dos RMSE locais, mostrando que os procedimentos foram eficientes para redução de erros locais.

A forma mais eficiente de representar a qualidade local de um modelo de elevação é através de um mapa de precisão local do MDE. O mapa de precisão é representado por uma superfície contínua, caracterizando a precisão do modelo ponto a ponto através de um valor de RMSE associado a cada célula do MDE corrigido. Para reforçar o resultado da análise das Tabelas 4.6 a 4.8, foram criados mapas de precisão para os MDEs através

da interpolação dos RMSE das 15 áreas usadas na avaliação, apresentados nas Tabelas 4.6 a 4.8. As grades de RMSE foram geradas na mesma resolução dos MDEs através do método de triangulação com interpolação linear que se mostrou eficiente nas etapas anteriores. As Figuras 4.5, 6.4 e 4.7 mostram, respectivamente, os mapas de precisão local obtidos para os MDEs processados por Dutra et al. (2002), Moura (2005) e para os MDEs processados nessa pesquisa gerados pelo arranjo tipo 1, sendo o MDE da banda P resultante da aplicação do método IQD e o MDE da banda X resultante do método da triangulação linear. Nas Figuras 4.5 a 4.7 o mapa (a) refere-se ao MDE da banda P, o mapa (b) ao MDE da banda X e as curvas sobrepostas às imagens de tons de cinza são as isolinhas de valores RMSE, ou isolinhas de precisão do MDE, extraídas de uma análise dos próprios mapas de precisão.

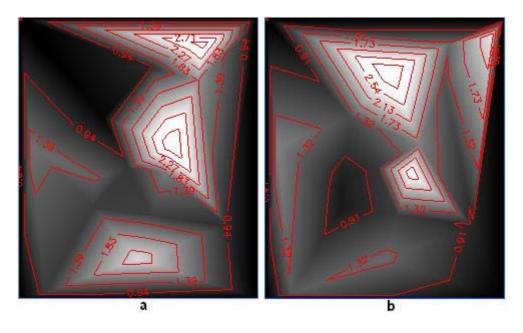


Figura 4.5 – Mapas de precisão local dos MDEs processados por Dutra et al. (2002), (a) banda P e (b) banda X.

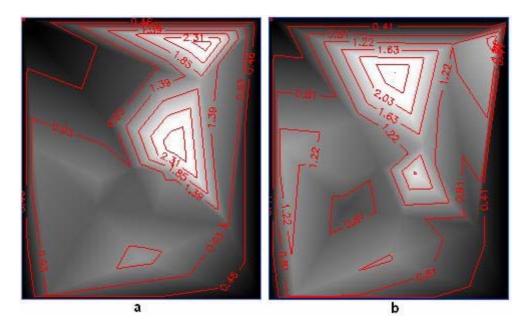


Figura 4.6 – Mapas de precisão local dos MDEs processados por Moura (2005), (a) banda P e (b) banda X.

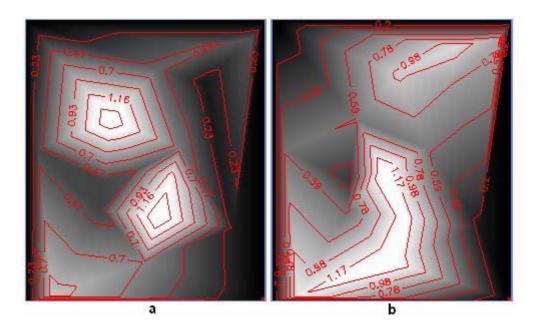


Figura 4.7 – Mapas de precisão local dos MDEs processados, (a) por IQD e (b) por triangulação com interpolação linear.

Os mapas de precisão apresentados nas Figuras 4.5 a 4.7 fornecem uma visão espacial da distribuição de erros locais. Cada local do mapa tem um valor numérico de qualidade geométrica associado, mostrando onde estão localizadas as regiões de maior e menor

qualidade e as mudanças dos gradientes de qualidade. As áreas mais escuras representam as qualidades melhores, enquanto as mais claras são as de menor qualidade.

A análise desses mapas complementa a interpretação dos dados das Tabelas 4.6 a 4.8, mostrando que existem alguns pontos nos modelos originais com erros locais grandes e outros com erros menores. As razões para a variação podem ser diversas, porém, é importante saber a localização e o valor de precisão associado. Medidas derivadas dos modelos, extraídas em áreas locais de menor precisão associada, terão seus atributos com qualidade também diminuída.

Com a retirada de *ouliers* e a aplicação das correções propostas, que permitiram mudanças relativas das posições das feições do MDE, os erros locais foram reduzidos em relação aos os trabalhos de Dutra et al. (2002) e de Moura (2005), como mostra a Figura 4.7 em comparação com as figuras 4.5 e 4.6. Estes resultados mostram que os os procedimentos de correção aplicados foram válidos para redução de erros locais, melhorando a qualidade interna dos MDEs.

#### 4.3.3. Resultados Pontuais

As análises de dados resultantes do tratamento de *outliers* e valores suspeitos apresentados no Capítulo 3 (Figura 3.12) indicaram que, devido aos diferentes critérios embutidos nos três algoritmos utilizados, os resultados de suas aplicações individuais também produziram dados um pouco diferentes. O ganho principal dessa fase da metodologia está no fato de que a aplicação de qualquer um dos três métodos ou variações destes para tratamento de *outliers* se mostrou capaz de agregar qualidade ao MDE processado. Quaisquer valores duvidosos identificados foram tratados, sendo substituídos pela média, mediana ou moda local. Os procedimentos atuaram apenas localmente sem implicar modificação de todo o MDE restante, como ocorre no uso de filtros convencionais para tratamento de ruídos. Os MDEs tratados para uso nas fases subseqüentes do trabalho de pesquisa foram submetidos a uma aplicação seqüencial dos três procedimentos testados. Esse processo foi equivalente à aplicação conjunta e simultânea de todos os critérios.

No MDE da banda P, por exemplo, que representa a superfície, teoricamente suavizada, do terreno sem cobertura vegetal foram encontrados alguns valores com mais de 7 metros acima ou abaixo de seus vizinhos imediatos. Isso caracteriza um *outlier* significativo do ponto de vista geográfico, representando um declive em torno 300%. Sem o devido tratamento, mesmo pequenas quantidades de erros de altura podem afetar muito alguns produtos derivados de análises de MDE, tais como acumulação de fluxos, índices de molhamento, curvaturas, rugosidades ou declividades e, subseqüentemente, todas as interpretações que dependem desses cálculos. O método da proximidade e declividade mostrou-se eficaz na identificação de *outliers* severos do ponto de vista geográfico, porém deixou de identificar alguns dos *outliers* mais suaves, tendo apresentado certa tendência de detectar menos pontos suspeitos do que os demais métodos nas mesmas condições.

A Figura 4.8-a mostra um exemplo, com janela de vizinhança 3x3, de um *outlier* de valor significativo, do ponto de vista geográfico, no MDE que foi identificado pelos três processos testados com suas variações e a Figura 4.8-b mostra o resultado do seu tratamento através da mediana local. A Figura 4.8-c mostra na janela 3x3 um *outlier* de valor pouco severo, do ponto de vista geográfico, que não foi identificado por todos os processos e o resultado do seu tratamento pela mediana local é mostrado na Figura 4.8-d. Os dados problemáticos que, eventualmente, escaparam de um dos critérios foram tratados pelos outros, resultando em um procedimento seguro que melhorou a qualidade pontual interna dos MDEs. Assim, o procedimento aplicado mostrou-se eficaz e os eventuais produtos derivados dos MDEs, como o MDA, as curvas de níveis, as classes de declividades, os mapas de concavidades e muitas outras análises possíveis de serem derivadas dos MDEs terão seus resultados menos afetados por *outliers*.

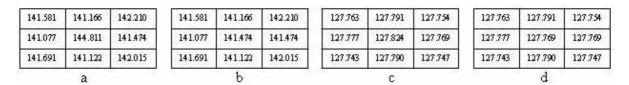


Figura 4.8 – (a) *outlier* significativo do ponto de vista geográfico identificado por todos os processos e (b) resultado do tratamento. (c) *outlier* pouco severo não identificado por todos os processos e (d) resultado do tratamento.

A Figura 4.9 ilustra a distribuição geográfica dos *outliers* identificados no MDE da banda P, decorrente de uma composição dos três métodos abordados na pesquisa. Para estes resultados, foi utilizada uma janela de vizinhança 5x5 com três interações de cada filtro. Os valores foram tratados através da substituição pela mediana local que foi considerada mais apropriada do que outros valores de tendência central como a média ou a moda. Resultou um total de cerca de 12000 pontos identificados e tratados.



Figura 4.9 – Distribuição geográfica dos *outliers* identificados no MDE da banda P, usando a composição de três métodos com janela 5x5 e 3 interações de cada filtro.

# 4.3.4 Resultados da análise do Padrão de Exatidão Cartográfica dos MDEs corrigidos

Os resultados da qualidade cartográfica dos MDEs corrigidos pelo método do IQD e triangulação foram avaliados com base no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) definido pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional (NTCN), estabelecidas no Decreto Lei 89817 de 1984. Alguns detalhes dessas normas são apresentados no Anexo A e um resumo dos dados numéricos de precisão extraídos do texto das normas está apresentado na Tabela 3.7 (Capítulo 3). Os MDEs são produtos digitais, assim, o erro

gráfico de 0.2 mm foi desconsiderado, pois não foram avaliados resultados impressos e a precisão numérica dos computadores torna este tipo de incerteza desprezível. O PEC dos MDEs foi definido em função de indicadores estatísticos da qualidade das transformações realizadas pelos métodos de correção (RMSE). Os MDEs corrigidos foram classificados, segundo esses parâmetros, em níveis compatíveis com escalas de mapeamento cartográfico usadas no SCN, as quais podem ser usadas como referência para compatibilidade de aplicações desses MDEs de acordo as NTCN.

Com base nos indicadores estatísticos obtidos nas fases de avaliação apresentados nas Tabelas 3.2 a 3.6, os MDEs mostraram-se compatíveis com diferentes escalas de mapeamento cartográfico, conforme o método de correção aplicado e os tipos de arranjos dos pontos de controle. As Tabelas 4.9 e 4.10 fornecem um resumo de dados dos MDEs da banda P e da banda X que permite organizar uma classificação segundo práticas cartográficas vigentes. Os MDEs para essa análise foram os corrigidos pelo IQD (Tabela 4.9) e pela triangulação com interpolação linear (Tabela 4.10), com os cinco diferentes tipos de arranjos de pontos de controle usados em cada um. Em função dos RMSE obtidos nos dois métodos de correção (Tabelas 3.3 e 3.4), foram calculados os valores de PEC (PEC=1.6449xRMSE) e os valores de limiar inferior da equidistância vertical das curvas de níveis (coluna "Lm.Eq.CNível" da Tabela 4.9) de acordo com as relações indicadas na Tabela 3.7 (classe "A" 3xRMSE, classe "B" (5/2)xRMSE e classe "C" 2xRMSE). A menor equidistância possível das curvas de níveis permitida no modelo, representada na coluna "Lm.Eq.CNível" da Tabela 4.9, é o parâmetro mais importante para caracterização cartográfica. Ele define a máxima resolução vertical associada ao modelo que, por sua vez, está associada à maior escala de mapeamento permitida para uma dessas classes "A", "B" ou "C" definidas nas NTCN. Apesar do estreito relacionamento entre resolução vertical e escala de mapeamento, não existe uma regra matemática que faça a associação rigorosa desses dois parâmetros. Portanto, os valores numéricos das escalas entraram nas tabelas como referências aproximadas, baseadas no SCN e nas práticas cartográficas vigentes. Foram consideradas seis escalas com as quais os modelos mostraram-se compatíveis: 1:8000, 1:10000, 1:15000, 1:20000, 1:25000 e 1:30000, de acordo com a gradação do PEC calculado dos modelos e com a classe de mapeamento (A, B ou C). Nas tabelas, os valores de RMSE, PEC e Lm.Eq.CNível são dados em metros.

Tabela 4.9 – Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método do IQD com os cinco arranjos da estrutura de controle.

MDE	Arranjo	RMSE	PEC	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.
				A	CNível	В	CNível	C	CNível
	1	1.694	2.786	1:10000	5.1	1:8000	4.2	1:8000	3.4
	2	1.744	2.869	1:10000	5.2	1:10000	4.4	1:8000	3.5
P	3	0.047	0.077	1:2000	0.1	1:2000	0.1	1:2000	0.1
	4	1.715	2.821	1:10000	5.1	1:10000	4.3	1:8000	3.4
	5	1.751	2.880	1:15000	5.3	1:10000	4.4	1:8000	3.5
	1	1.743	2.867	1:10000	5.2	1:10000	4.4	1:8000	3.5
	2	1.870	3.076	1:15000	5.6	1:10000	4.7	1:8000	3.7
X	3	0.041	0.067	1:2000	0.1	1:2000	0.1	1:2000	0.1
	4	1.805	2.969	1:15000	5.4	1:10000	4.5	1:8000	3.6
	5	1.901	3.127	1:15000	5.7	1:10000	4.8	1:8000	3.8

Tabela 4.10 – Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método da triangulação com interpolação linear.

MDE	Arranjo	RMSE	PEC	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.
				A	CNível	В	CNível	C	CNível
	1	1.864	3.066	1:15000	5.6	1:10000	4.7	1:8000	3.7
	2	1.912	3.145	1:15000	5.7	1:10000	4.8	1:8000	3.8
P	3	0.052	0.086	1:2000	0.2	1:2000	0.1	1:2000	0.1
	4	1.890	3.109	1:15000	5.7	1:10000	4.7	1:8000	3.8
	5	1.947	3.203	1:15000	5.8	1:10000	4.9	1:8000	3.9
	1	1.560	2.566	1:10000	4.7	1:8000	3.9	1:8000	3.1
	2	1.691	2.782	1:10000	5.1	1:8000	4.2	1:8000	3.4
X	3	0.037	0.061	1:2000	0.1	1:2000	0.1	1:2000	0.1
	4	1.611	2.650	1:10000	4.8	1:8000	4.0	1:8000	3.2
	5	1.712	2.816	1:10000	5.1	1:10000	4.3	1:8000	3.4

As NTCN não estabelecem a quantidade de pontos necessária para testar o PEC, nem como devem ser amostrados estes dados cartográficos. O arranjo tipo 3 foi o mais adequado para correção dos MDEs, pois utilizou todos os pontos de controle disponíveis, entretanto apresentou um resultado exageradamente otimista de PEC, tendo em vista que o conjunto de pontos de teste foi o mesmo de treinamento que indicou compatibilidade do modelo com uma escala muito grande de 1:2000 (que não foi considerada). Não é um arranjo apropriado para uso na avaliação cartográfica devido ao RMSE correspondente

não ser resultante de pontos independentes, assim, os demais arranjos são os mais realistas para essa avaliação.

Os números apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10 fornecem, assim, uma base de referência compatível com padrões consolidados e aceitos no meio cartográfico para a avaliação da qualidade dos MDEs corrigidos neste trabalho. Observou-se, por exemplo, que para a classe "A" os métodos de Moura (2005) e Dutra et al. (2002) mostraram-se compatíveis com as escalas entre 1:15000 e 1:25000, respectivamente, apresentando qualidade inferior aos métodos do IQD e da triangulação. As tabelas que mostram a classificação completa dos MDEs corrigidos por Dutra et al. (2002) e Moura (2005) são apresentadas no Apêndice A. Sem considerar o arranjo 3, o melhor resultado das Tabelas 4.9 e 4.10 para a classe "A", na banda X, permite gerar mapas de curvas de níveis com equidistância de até 4.7 metros, compatível na prática cartográfica com escalas entre 1:8000 e 1:10000. O pior resultado permite gerar mapas de curvas de níveis com equidistância de até 5.7 metros, compatível na prática da cartografia com escalas entre 1:10000 e 1:15000. Considerando as classes de mapeamento "B" e "C", devido aos valores de PEC menos restritivos, os limiares inferiores das curvas de níveis diminuem até o limite de 3.1 metros, aumentando o valor permitido para as escalas de mapeamento chegando até escalas entre 1:5000 e 1:8000. Analiasndo os modelos originais para a classe "A", com base nas tabelas apresentadas no Apêndice A, conclui-se que o modelo de Moura (2005) permite curvas de níveis com equidistância entre 6.4 e 7.3 metros, compatível com escalas entre 1:15000 e 1:20000 e o de Dutra et al. (2002) permite curvas de níveis com equidistância entre 8.9 e 11.8 metros, compatível com escalas entre 1:25000 e 1:30000.

A avaliação da qualidade cartográfica dos MDEs é importante na medida em que seu uso em sistemas de informações geográficas permite a incorporação, em um mesmo projeto ou sistema, de dados geográficos provenientes de diferentes fontes. No mesmo sistema de informações geográficas pode haver dados espaciais com diferentes graus de precisão, exatidão e confiabilidade. Um projeto de dados espaciais robusto deve dispor de indicadores sobre a origem e grau de confiabilidade de cada tipo de informação geográfica componente do conjunto. Esse aspecto é fundamental para dar aos analistas e usuários dos dados geográficos do sistema, os subsídios que permitam fazer estimativas

da precisão e da confiabilidade de consultas e análises derivadas da base de dados do projeto.

#### 4.4 Resultados de comparação do MDE banda P com pontos medidos sob a floresta

A Tabela 4.11 fornece o resumo dos parâmetros estatísticos extraídos das seis áreas de avaliação, apresentadas na Figura 3.21, inseridas no conjunto da metodologia, apresentadas no Capítulo 3, para fins de avaliação do MDE da banda P com pontos medidos no chão da floresta. A coluna "QPts" indica a quantidade de pontos utilizados em cada área avaliada. Os resultados da Tabela 4.11 representam as discrepâncias entre os valores da verdade terrestre, obtidos por métodos topográficos de precisão, e os valores correspondentes no MDE da banda P corrigido pelo método do IQD.

Tabela 4.11 – Indicadores numéricos da qualidade do MDE da banda P comparada com os levantamentos de campo.

Área	QPts	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
1 (F9)	28	-1.212	2.502	0.217	0.618	0.756
2 (F10)	14	-1.950	2.307	0.133	0.822	1.002
3 (J5)	20	-2.371	2.709	-0.075	1.062	1.230
4 (F16)	14	-1.866	2.388	0.097	0.900	1.102
5 (CEMEX)	28	-2.428	2.858	-0.140	1.145	1.491
6 (R37)	16	-2.124	2.352	0.027	0.870	1.026

Analisando os dados da Tabela 4.11 observa-se que os valores médios das altitudes do MDE da banda P ficaram muito próximos dos valores da verdade terrestre em todas as áreas avaliadas (média: 0.043 m), com as incertezas representadas pelo RMSE (média: 1.101 m) e MAE (média: 0.903 m) em torno de um metro e com amplitude entre máximos e mínimos em torno de quatro metros. Estes dados mostraram a capacidade de penetração da radiação da banda P na floresta fechada e nas regenerações florestais, reforçando a tese de que esta banda tem potencial de produzir um MDT muito próximo da realidade geográfica do terreno. Apesar da indicação satisfatória dos resultados nesses locais avaliados, deve-se ressalvar que o número total de seis amostras, cada uma delas composta de poucos pontos de medidas, não é suficiente para a generalização desses resultados em extensões geográficas maiores, fora da área de estudo. Outros estudos

ainda devem ser realizados para que se possa chegar a resultados efetivamente conclusivos.

A Tabela 4.12 mostra um resumo dos parâmetros numéricos de avaliação da área de teste, ilustrada na Figura 3.22, para fins de avaliação da banda P em região de florestas por meio de comparação com pontos medidos no chão. Essa parcela estava coberta por florestas em 2000, durante o vôo de aquisição dos MDEs InSAR, mas foi desmatada para fins de cultivo agrícola e medida por métodos topográficos em 2005. Os dados referemse às diferenças entre o MDT obtido por métodos topográficos e os MDEs InSAR. Nesta análise estão sendo considerados os MDEs da banda P corrigidos por Dutra et al. (2002), por Moura (2005) e o MDE processado na pesquisa pelo método do IQD.

Tabela 4.12 – Indicadores numéricos dos MDEs da banda P avaliados com o MDT de campo.

MDE	Mínimo	Máximo	Média.	MAE	RMSE
Dutra	-2.466	3.200	0.356	1.863	1.987
Mour	-2.350	3.085	0.371	1.785	1.861
a					
IQD	-2.523	2.382	-0.127	1.161	1.407

Analisando os dados da Tabela 4.12 observa-se que os resultados obtidos com o modelo da banda P processado pelo método do IQD são melhores que os de Dutra et al. (2002) e Moura (2005). Os resultados mostraram, ainda, que as médias dos valores da verdade terrestre ficaram muito próximas das médias dos valores dos MDEs InSAR da banda P, confirmando a teoria de que a penetração da radiação radar em banda P efetivamente ocorre na floresta fechada e nas regenerações florestais, ratificando o potencial dessa banda do espectro para produzir um MDT representativo da realidade geográfica. Apesar da indicação satisfatória desses resultados de avaliação, deve-se ressalvar que se trata de uma área de teste muito pequena, insuficiente para permitir a generalização dos resultados fora da área de estudo. Portanto, recomendam-se mais pesquisas, com maior riqueza de amostras para maior garantia de resultados conclusivos.

### 4.5 Resultados de comparação dos MDEs corrigidos com dados LIDAR

A Tabela 4.13 fornece o resumo dos parâmetros estatísticos extraídos da avaliação realizada com os nove perfis de varredura a laser (LIDAR) selecionados para comparação com os MDEs, introduzidos no Capítulo 3 e mostrados na Figura 3.23-b. Na Tabela 4.3, os resultados de chão representam as discrepâncias entre valores de pontos do LIDAR mínimo e os correspondentes do MDE da banda P, enquanto os resultados de topo representam as discrepâncias entre o LIDAR máximo e o MDE da banda X de regiões correspondentes.

Tabela 4.13 – Indicadores da qualidade local dos MDEs avaliados com perfis LIDAR.

Perfil	Chão(LIDAR mínimo - MDE P)					Topo(LIDAR máximo - MDE X)				
LIDAR	Mín	Máx	Média	MAE	RMSE	Mín	Máx	Média	MAE	RMSE
1	-	7.878	2.398	1.072	1.252	-	7.878	3.038	1.333	1.631
	4.522					5.142				
2	-	6.998	1.625	0.888	1.087	-	7.998	2.059	1.506	1.821
	3.595					4.047				
3	-	6.880	1.597	1.030	1.206	-	6.880	2.225	1.456	1.763
	3.532					4.138				
4	-	6.948	1.558	0.974	1.137	-	7.948	2.166	1.532	1.879
	3.592					4.032				
5	-	5.878	0.820	1.071	1.249	-	7.878	1.962	1.383	1.668
	2.522					2.142				
6	-	6.998	1.125	0.940	1.127	-	6.998	1.749	1.506	1.808
	1.595					2.047				
7	-	4.880	0.855	1.026	1.209	-	4.880	1.691	1.449	1.765
	3.532					3.138				
8	-	6.948	1.096	0.955	1.123	-	6.948	1.805	1.556	1.882
	1.592					2.032				
9	-	4.878	0.903	1.077	1.255	-	5.878	1.973	1.337	1.639
	3.522					3.142				

A Figura 4.10 mostra um exemplo gráfico de comparação entre perfis LIDAR e os seus correspondentes extraídos dos MDEs, referente à área número 4 (Tabela 4.13 e Figura 3.22). Na parte superior da figura, se vê a imagem obtida a partir do vôo da videografia de alta resolução, com a trajetória do LIDAR destacada em vermelho, e abaixo são mostrados os perfis extraídos do MDE da banda P, MDE da banda X, LIDAR mínimo e LIDAR máximo. A Figura 4.10 representa uma forma de visualização gráfica dos dados numéricos expressos na Tabela 4.13. Estes dados tabulares e gráficos mostraram que, para a banda P, o RMSE e o MAE oscilaram entre 1 e 1.5 metros, a amplitude entre

mínimos e máximos variou em torno de 9 metros e a média se manteve próxima de 1.3 metros. O resultado da coluna "Media" referente ao "Chão(LIDAR mínimo - MDE P)" da Tabela 4.13 e dos gráficos correspondentes também indicaram uma possível capacidade menor do LIDAR de atingir o solo da floresta do que a radiação da banda P. Para a banda X o RMSE e o MAE ficaram entre 1 e 2 metros, a amplitude entre mínimos e máximos ficou em torno de 10 metros e a média se manteve em torno de 2 metros. O resultado da coluna "Media" referente ao "Topo(LIDAR máximo - MDE X)" da Tabela 4.13 indicaram a possibilidade de que as medidas de LIDAR máximo representem as folhagens mais altas da cobertura de vegetação e que as medidas do MDE da banda X representem uma média das folhagens do topo das copas das árvores.

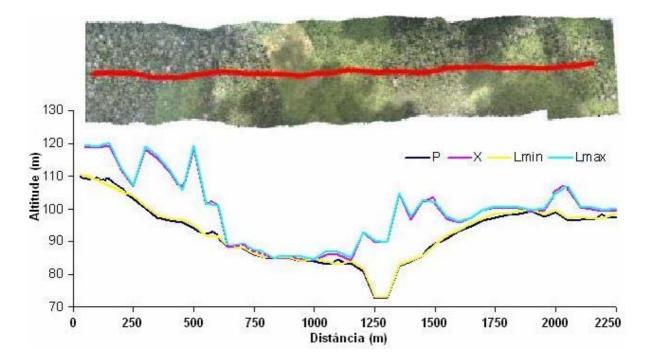


Figura 4.10 – Comparação de perfis MDE e LIDAR. Parte superior: videografia com a trajetória do LIDAR em vermelho. Abaixo: perfis MDE P, MDE X, LIDAR mínimo e LIDAR máximo.

A Figura 4.10 mostra também que os perfis (MDE da banda P, MDE da banda X, LIDAR mínimo e LIDAR máximo) são bastante coerentes com a cobertura de vegetação correspondente apresentada na imagem de videografia. Nesta parcela existem trechos de florestas, regenerações de várias idades e pastagens que são claramente representados na imagem e nos gráficos. A Figura 4.11 ilustra o gráfico de dispersão de alturas da

vegetação obtidas por InSAR versus alturas obtidas por LIDAR, referente à mesma parcela da Figura 4.10, mostrando uma alta correlação entre as alturas obtidas pelos dois métodos. A correlação foi confirmada pelo alto coeficiente de determinação (R²) de 0.86 obtido na regressão dos dois tipos de dados analisados e pela equação da reta ajustada nesta parcela que resultou na relação: AltLIDAR = 1.050(AltInSAR) + 1.68. O coeficiente angular em torno da unidade mostra ótima correspondência entre os dois tipos de medidas da altura da vegetação e a intersecção em torno de um metro e meio mostra que as medidas LIDAR apresentam-se um pouco maior que as medidas InSAR, porém, praticamente, dentro da incerteza dos dados envolvidos.

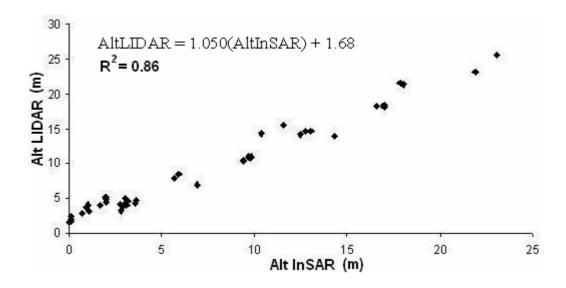


Figura 4.11 – Dispersão das alturas da vegetação InSAR versus LIDAR.

As alturas obtidas por LIDAR mostraram-se, em média, maiores que as alturas InSAR. Uma possível explicação para este resultado deve-se às medidas pontuais nas folhas mais altas tomadas pelo LIDAR, enquanto as medidas InSAR referem-se à média de uma área de 6.25 m² correspondente à célula de resolução do MDE.

Os dados LIDAR não foram obtidos com a mesma qualidade das medidas dos levantamentos topográficos, pois o receptor GPS do sistema foi usado no método cinemático diferencial com processamento em tempo real que introduz uma incerteza aproximada de um metro nas posições. Algumas simplificações no processo de filtragem e calibração podem ter contribuído também para redução da qualidade dos dados LIDAR (TIMBÓ ELMIRO et al., 2006). Entretanto, os resultados mostraram que os valores

ficaram bastante coerentes e se prestaram como mais uma forma de validação dos diferentes recursos de avaliação do trabalho, reforçando a hipótese da validade dos métodos de correção empregados no tratamento dos MDEs da FLONA Tapajós.

#### 4.6 Resultados da extração de alturas da floresta (MDA)

O MDE da banda X que apresentou o melhor resultado de correção (corrigido por triangulação com interpolação linear) foi subtraído do MDE da banda P que apresentou o melhor resultado de correção (corrigido pelo método do IQD). A diferença entre os dois modelos (MDE X – MDE P) representa potencialmente um modelo digital de alturas da floresta (MDA), pois o MDE da banda X representa potencialmente a superfície de cobertura do solo e o MDE da banda P representa potencialmente o solo sem as coberturas vegetais. O MDA é um produto derivado de MDE InSAR de grande potencial de aplicações, que pode ser usado para vários propósitos incluindo a estimativa de biomassa em grandes extensões, uso como informação auxiliar para a classificação e mapeamento de cobertura do solo, estudos de volumes de florestas, além de aplicações de engenharia florestal e ambiental em geral.

A Figura 4.12-a ilustra o modelo digital de alturas da floresta obtido pelo processo descrito, representado na forma de imagem de tons de cinza ao lado de uma composição RGB-543 de imagens LANDSAT (Figura 4.12-b), obtida na mesma época dos dados InSAR. As áreas escuras no MDA representam os solos expostos e pastagens, os tons intermediários são as regenerações de diferentes estágios de crescimento, enquanto os tons mais claros representam florestas primárias com árvores dominantes. A simples comparação visual do MDA com a imagem LANDSAT correspondente indica, à primeira vista, que foram atingidos resultados satisfatórios.

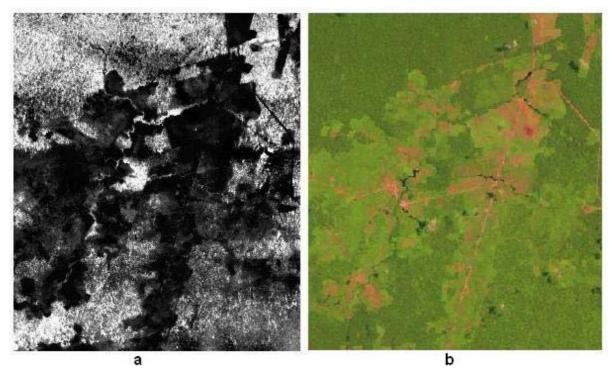


Figura 4.12 – (a) MDA da floresta, tons escuros: solos expostos; tons médios: regenerações; tons claros: florestas. (b) Imagem LANDSAT RGB correspondente.

Outras análises qualitativas envolvendo avaliações gerais fornecidas por diversos documentos de inventários disponíveis, imagens de sensores ópticos, reconhecimentos de campo e estudos florestais da região (DUTRA et al., 2002; SANTOS et al., 2002, 2003; TIMBÓ ELMIRO et al., 2003; MOURA, 2005) também indicaram que o MDA da floresta resultou compatível com trabalhos anteriores e com as expectativas do estudo.

O MDA resultante dos MDEs corrigidos, obtido através desses passos consistentes, é um produto que pode, então, ser utilizado com confiança para outras aplicações, como por exemplo, a classificação de alturas interferométricas para determinação de estruturas florestais. Entretanto, análises quantitativas e a inspeções cuidadosas do MDA revelaram a existência de muitas células com valores negativos, além de mínimos com valores absolutos elevados, indicando que alguns problemas deixaram de ser tratados pelos métodos de correção aplicados nos MDEs individuais. Estudos com modelos interferométricos realizados por Gama (2007), em povoamentos florestais de eucalyptus, identificaram erros mais significativos no MDE da banda P do que no MDE da banda X em terrenos com coberturas de pasto, devido à baixa coerência da banda P em áreas

pouco rugosas. Isso talvez possa explicar, em parte, o problema identificado no MDA, mesmo tratando-se de áreas de trabalhos diferentes. As Tabelas 3.2 a 3.6 e 4.3 também indicam, através das médias, a banda P um pouco acima da banda X. Estes pontos duvidosos na análise do MDA necessitam de investigações posteriores em busca de esclarecimentos seguros em relação as suas causas. Entretanto, para reduzir de imediato o efeito do problema identificado, propiciando uma calibração mais adequada das alturas interferométricas, foi realizada uma etapa adicional de refinamento do MDA descrita no tópico a seguir.

#### 4.6.1 Refinamento do MDA para determinação de alturas florestais

Os métodos de correção aplicados nos MDEs, de forma independente, produziram os melhores ajustes individualmente em relação a referências externas. Portanto, foi aplicada uma metodologia de correção exclusivamente interna ao MDA, feita de forma independente dos procedimentos de correção por bandas separadas aplicados anteriormente. A correção consistiu em identificar e classificar através das imagens de magnitude da banda X e da banda P, imagens TM LANDSAT e imagens de videografia de alta resolução, o maior número possível de áreas de solos nus, livres de coberturas vegetais nos modelos. Foram identificadas 57 áreas com essas características cujas posições são mostradas na Figura 4.13-a. A correção adotada foi fundamentada no presuposto de que nas áreas sem cobertura vegetal o valor da diferença (MDE X - MDE P) é, teoricamente, próximo de zero. Assim, foram extraídas do MDA as médias das coordenadas tridimensionais (E, N, h<sub>int</sub>) dos pontos contidos no fecho convexo das áreas sem cobertura identificadas, resultando em 57 pontos médios com os valores de h<sub>int</sub> representando os erros verticais do MDA. Os 57 pontos foram utilizados como amostras para a geração de uma superfície de correção para o MDA, independente da correção dos MDEs individuais. O método de interpolação utilizado para geração da superfície foi o da triangulação com interpolação linear. A superfície resultante, mostrada na forma de imagem de tons de cinza na Figura 4.13-b, foi usada como correção do modelo diferença para redução dos problemas encontrados.

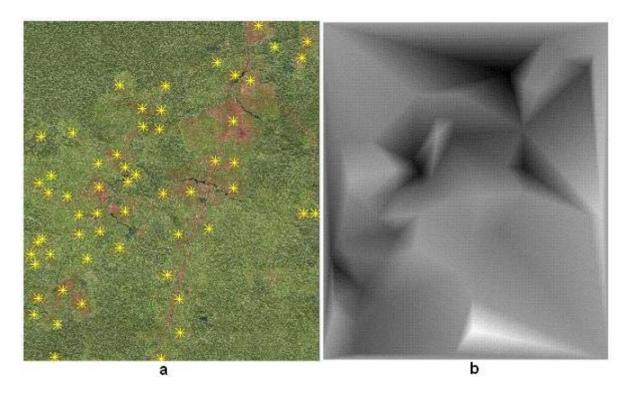


Figura 4.13 – (a) Localização das áreas desprovidas de cobertura vegetal para refinamento do MDA, e (b) superfície de correção do MDA.

Para reduzir o valor absoluto dos mínimos negativos foi aplicado no MDA, um filtro utilizando os algoritmos de Chauvenet e do *boxplot* (Figuras 3.9 e 3.10) com uma janela de vizinhança 3x3 atuando somente nas células de valores negativos. Para mostrar as melhorias obtidas nessa correção do MDA, foi feita uma análise pelo fatiamento dos valores negativos nos modelos diferença (Figura 4.14). As Figuras 4.14-a, 4.14-b e 4.14-c correspondem, respectivamente, ao MDA corrigido por Dutra et al. (2002), ao MDA resultante dos MDEs corrigidos individualmente e ao MDA refinado pela triangulação e filtragem. O MDA calculado com base nos estudos de Moura (2005) produziu resultados pouco melhores que o MDA baseado em Dutra et al. (2002), porém muito similares não sendo mostrado na Figura 4.14. Os pontos em vermelho representam valores negativos encontrados nos MDA, indicando que os problemas foram progressivamente reduzidos.

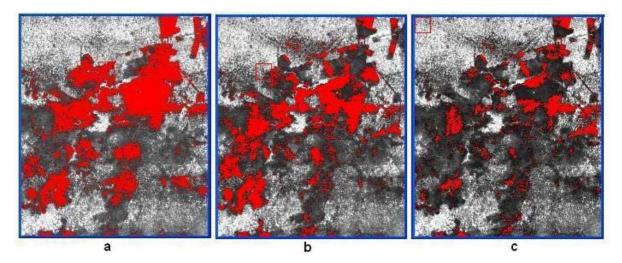


Figura 4.14 – (a) Fatiamento do MDA de Dutra et al. (2002). (b) Fatiamento do MDA resultante dos MDEs corrigidos. (c). Fatiamento do MDA refinado por triangulação e filtragem.

A Tabela 4.14 resume valores quantitativos dessa análise, mostrando que os MDA processados por Dutra et al. (2002) e Moura (2005) apresentaram valores de avaliação muito próximos, o MDA resultante dos MDEs corrigidos individualmente melhorou os resultados em relação a Dutra et al. (2002) e Moura (2005) e o MDA refinado por triangulação apresentou os melhores resultados dentre todos avaliados. No MDA refinado, o total de células negativas foi reduzido, a média dos valores negativos aproximou-se de zero e o valor absoluto do mínimo foi bastante reduzido mostrando que os altos valores absolutos de mínimos anteriores eram pontos de *ouliers*. O MDE tem uma grade regular de 4518 x 5311, resultando em um total de 23995098 células.

Tabela 4.14 – Comparação de valores negativos encontrados nos diversos MDA.

MDA	Mínimos (m)	Total células	Média dos
		negativas em %	valores
			negativos (m)
Dutra 2002	-33.694	13%	-1.7
Moura 2005	-33.364	12%	-1.5
MDEs	-25.345	9%	-1.2
Corrigidos			
Refinado	-2.725	5%	-0.6

Uma avaliação externa detalhada do MDA ficou fora dos objetivos da presente pesquisa. Porém, podem ser mencionados procedimentos adotados em outros trabalhos

relacionados à área de estudo da FLONA Tapajós e à linha de pesquisa (TIMBÓ ELMIRO et al., 2003, 2006). A forma de avaliação utilizada consistiu em usar alturas de árvores, medidas por métodos de engenharia florestal, na forma de transectos geograficamente espalhados no MDE, abrangendo áreas com cobertura de florestas primárias e de regenerações de diferentes estágios de crescimento. As alturas das árvores obtidas dos transectos foram comparadas com os valores correspondentes obtidos no MDA. O RMSE das diferenças foi usado como estimador da qualidade do MDA. O processamento de alguns transectos existentes na área de estudo indicou resultados preliminares coerentes com as medidas do MDA da floresta (TIMBÓ ELMIRO et al., 2006).

## 4.7 Análise dos resultados da biomassa derivada do MDA e do retorno $\sigma^0_{HH}$ banda P

Segundo Pinheiro et al. (2007) as estimativas de biomassa na Amazônia variam bastante, podendo este fato ser explicado pela escassez das medidas de biomassa realizadas na região, pelas diferenças metodológicas que dificultam a comparação dos dados, pela composição floristica diversa e por fatores naturais relacionados às micro-variações nas propriedades do solo e na topografia. Estudos de Lima et al. (2007) mostram que o estoque de biomassa recuperado dez anos após a formação de uma capoeira é de cerca de 16% do estoque original, tendo sido identificada uma queda gradual no incremento com o envelhecimento da capoeira. O tempo médio estimado para retorno ao estoque original foi reportado em 61 anos. Com base em dados médios indicados por estudos da literatura, o resultado da biomassa estimada pelo modelo dado na Equação 3.17, apresentado na Figura 3.24, foi classificado nos sete extratos a seguir: 1) menos de 5 ton/ha correspondentes a solos preparados para platio, culturas agrícolas e pastagens; 2) de 5 a 60 ton/ha correspondentes a regeneração natural em fase inicial ou intermediária; 3) de 60 a 100 ton/ha correspondentes a regenerações em fase avançada; 4) de 100 a 200 ton/ha correspondentes a florestas já recuperadas provenientes de regenerações muito avançadas; 5) de 200 ton/ha a 300 ton/ha correspondentes a áreas de florestas primárias de dossel mais uniforme situadas em baixios, vertentes e platôs; 6) de 300 ton/ha a 350 ton/ha correspondentes a trechos de florestas primárias muito densas; 7) mais que 350 ton/ha correspondentes a trechos pontuais de florestas primárias muito densas com

ocorrência de emergentes. Para complementar o estudo, o MDA também foi submetido a um fatiamento em sete faixas de alturas correspondentes a valores médios de fisionomias florestais, determinados empiricamente com base na observação da área de estudo e em valores médios indicados na literatura. As faixas de alturas, em metros, correspondentes, aproximadamente, às fisionomias florestais sugeridas nos sete estratos de biomassa definidos foram: 0 a 2; 2 a 6; 6 a 12; 12 a 18; 18 a 25; 25 a 32 e acima de 32. A Figura 4.15-a mostra o resultado do fatiamento da biomassa nas sete classes definidas e a Figura 4.15-b ilustra o MDA fatiado nos sete níveis sugeridos de alturas da floresta. Embora, as faixas de alturas, determinadas de forma empírica, tenham sido indicadas como simples referências para visualização do MDA em camadas florestais, apresentaram similaridade compatível com o fatiamento da biomassa.

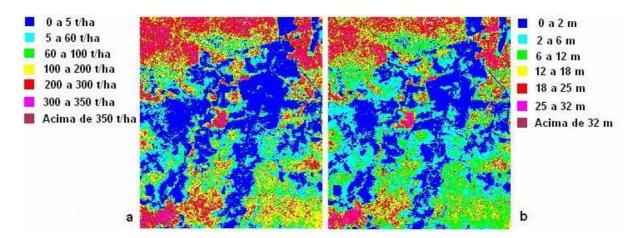


Figura 4.15 – (a) Mapa com sete classes de biomassa obtidos do MDA, e (b) fatiamento do MDA em sete faixas de altura.

Quando se utilizam modelos de estimativa de biomassa, com base na regressão, usando somente a variável de retroespalhamento do radar, as quatro últimas faixas (Figura 4.15-a), 100 a 200 ton/ha; 200 a 300 ton/ha; 300 a 350 ton/ha e maior que 350 ton/ha, não podem ser propriamente distinguidas da faixa de 60 a 100 ton/ha por causa da saturação no limite superior da estimativa para biomassa em 100 ton/ha, aproximadamente. A Figura 4.16–a mostra o mapa de desvio padrão da estimativa de biomassa com 4 classes, e a Figura 4.16–b mostra a representação em três dimensões da imagem de valores de desvio padrão da estimativa de biomassa.

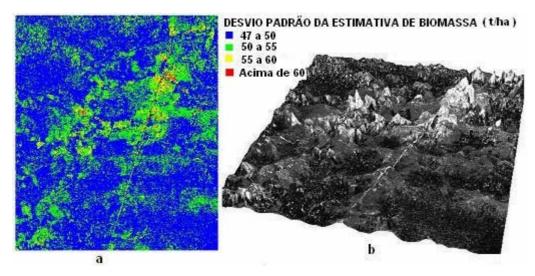


Figura 4.16 – (a) Mapa com 4 classes de desvio padrão da estimativa de biomassa, e (b) representação 3D da imagem de desvio padrão da estimativa de biomassa.

Diversos estudos da literatura podem confirmar as imprecisões de estimativas de biomassa na Amazônia (LAURANCE et al., 1999; HOUGHTON et al., 2001; NASCIMENTO e LAURANCE, 2002; SANTOS et al., 2002; SANTOS et al., 2003; CASTILHO, 2004; LIMA et al., 2007; PINHEIRO et al., 2007; MATOS e KIRCHNER, 2008). Isto torna difícil o uso dos resultados dessa fase da pesquisa como um aferidor fidedigno da qualidade dos métodos de correção de MDE. Apesar dessas variações encontradas na literatura, os resultados de biomassa derivados da modelagem que inclui o MDA refinado, resultante dos MDEs corrigidos, ficaram de acordo com muitos desses estudos da literatura e constituíram mais um fator de fortalecimento da hipótese de validade dos métodos de correção de MDE, desenvolvidos neste trabalho de pesquisa.

## CAPÍTULO 5

#### CONCLUSÕES

A avaliação, correção e melhorias de modelos digitais de elevação InSAR para aplicações em ambientes de florestas tropicais como a Amazônia, continua sendo tema corrente de muitos estudos. Assim, as conclusões deste trabalho, devido à dinâmica das investigações científicas dessa área, ficaram limitadas ao escopo geográfico e temático do ambiente de estudo. Entretanto, as análises e discussões dos resultados propiciaram inferências que contribuíram para reforço do potencial de utilização de modelos InSAR da banda P e da banda X nas aplicações voltadas para mapeamento e inventário dos recursos da Terra. As principais conclusões do trabalho que contribuíram para reforço destes pontos são as seguintes:

A aplicação da metodologia desenvolvida produziu resultados que atingiram os objetivos propostos. Os diferentes métodos de correção permitiram fazer ajustes nos modelos InSAR que resultaram em diferentes escalas de melhoria de qualidade, apresentando resultados globais e locais consistentes, determinados numericamente através de análises teóricas e modelos matemáticos.

Em termos de erros globais os modelos tinham, para a banda P antes das correções, os seguintes valores, em metros, de RMSE: 3.130 para Dutra et al. (2002) e 2.330 para Moura (2005), após as correções, de acordo com os métodos, passaram para os seguintes valores: 3.068 no *offset*, 2.118 no *splines*, 1.949 na krigagem, 1.864 na triangulação e 1.694 no IQD. Para a banda X tinham antes os seguintes RMSE: 2.968 para Dutra et al. (2002) e 2.145 para Moura (2005), com as correções, de acordo com os métodos, passaram para valores: 2.910 no *offset*, 1.950 no *splines*, 1.794 na krigagem, 1.560 na triangulação e 1.743 no IQD. Em média, passaram de 10 para 5 metros em capacidade de eqüidistância vertical de curvas de níveis, equivalente a evoluir de uma escala em torno de 1: 25000 para outra em torno de 1:10000. As correções promoveram os MDEs de padrões de exatidão cartográfica, antes inferiores para padrões superiores, indicando a validade das correções empregadas nos MDEs.

Em termos de erros locais os modelos tinham para a banda P, antes das correções, os seguintes valores médios, em metros, de RMSE: 1.579 para Dutra et al. (2002) e 1.372 para Moura (2005), após as correções passou para 0.673 no IQD. Para a banda X tinham antes os seguintes RMSE: 1.502 para Dutra et al. (2002) e 1.285 para Moura (2005), com as correções passou para 0.832 na triangulação. As correções proporcionaram melhoria na qualidade interna dos modelos aproximando-os da verdade geográfica do terreno em exatidão e precisão, mostrando a validade dos métodos de correções empregados nos MDEs.

Os resultados revelaram que os dados altimétricos da área de estudo produzidos pelo método InSAR em banda P e banda X necessitavam de avaliações e correções antes de poderem ser utilizados em outras aplicações para derivação de produtos a partir das análises desses MDEs. Essa conclusão foi indicada para o caso particular dos MDEs da Floresta Nacional de Tapajós, mas, possivelmente, se aplica ao caso geral de MDEs.

O RMSE máximo de 3.811 metros incluindo todas as bandas, métodos de correção e arranjos dos pontos e áreas de controle ocorreu no arranjo 5 do método do offset para o MDE da banda P (Tabela 3.2). Este valor máximo pode ser considerado como um estimador global de precisão conservadora para os MDEs corrigidos. O RMSE médio de 1.891 metros, calculado a partir dos 50 resultados das Tabelas 3.2 a 3.6, pode ser considerado um estimador provável da precisão global para ser usado com segurança em relação aos MDEs. Excluindo os arranjos do método do offset o RMSE médio (calculado a partir de 40 arranjos) cai para 1.538 metros, ficando no mesmo nível do RMSE mínimo de 1.560 metros (calculado com pontos de teste independentes) que ocorreu no arranjo 1 do método da triangulação para o MDE da banda X (Tabela 3.3) o qual pode ser considerado um resultado realista para os MDEs corrigidos. Os RMSE não independentes, muito otimistas, dos arranjos tipo 3 para a banda P (Triangulação: 0.052, IQD: 0.047, splines: 0.059, krigagem: 0.054) e para a banda X (Triangulação: 0.037, IQD: 0.041, splines: 0.043, krigagem: 0.043) não se recomendam que sejam usados como estimadores de precisão global dos MDEs. Embora este arranjo seja o mais recomendado e o que é efetivamente usado para a correção definitiva dos MDEs.

Devido aos erros que ainda permaneceram no modelo digital de alturas (MDA) após a aplicação das diversas modalidades de correções nos MDEs individuais, concluiu-se que podem ter ocorrido alguns erros locais mais severos nos dados InSAR da FLONA Tapajós. Esses problemas podem ter ocorrido fora das áreas dos pontos de controle e longe dos efeitos dos métodos de correção. Os erros, provavelmente ocasionados pela interação de fatores complexos que participaram da geração do MDE ou devido a falhas em alguma fase do processo, não puderam ser identificados nem totalmente corrigidos pelo presente estudo, devendo ser motivação para pesquisas futuras.

O modelo banda P ficou, em média, 1.331 metros abaixo do LIDAR relativo ao chão da floresta, com RMSE de 1.183 metros e o modelo banda X ficou 2.074 metros abaixo do LIDAR que representa o topo da vegetação, com RMSE de 1.762 metros. Considerando que o LIDAR utilizado obtém medidas do espectro infravermelho com *footprint* estreito, onde a resposta do chão é a que resulta da radiação que penetra nos buracos entre copas de árvores, o retorno pode ocorrer em galhos e folhas rasteiras antes de atingir o solo. Já os pulsos LIDAR de topo da cobertura vegetal, devido ao estreito *footprint*, são os que retornam nas folhas mais altas das copas, as quais são muito irregulares, com rugosidade maior que o chão. Isso pode justificar a maior diferença (LIDAR - MDE InSAR) no topo da vegetação do que no chão e, consequentemente, a maior altura das árvores determinadas por LIDAR (LIDAR máximo - LIDAR mínimo) do que por InSAR (banda X - banda P). A coerência destes resultados mostrou que os procedimentos de avaliação por meio de dados LIDAR foram válidos.

Vários resultados do trabalho confirmam uma afirmação já aceita, baseada na prática geral de correções geométricas envolvendo dados de sensoriamento remoto, que estabelece que aumentando a quantidade de pontos de controle e uniformizando sua distribuição espacial, melhores resultados são atingidos (BURROUGH e MCDONNELL, 1998; LILLESAND e KIEFER, 1999). Esta conclusão foi inferida porque em cada método de correção os arranjos do tipo 3 apresentaram os melhores indicadores estatísticos seguidos dos arranjos do tipo 1, 4, 2 e 5, os quais correspondem a uma redução progressiva da quantidade de pontos de controle.

Vários resultados mostraram que a aplicação dos métodos de correção, além de melhorar a qualidade geométrica dos MDEs, forneceu também as estimativas numéricas de exatidão globais e locais. Estes indicadores podem ser usados pelos analistas de dados espaciais para estimar, quantitativamente e com apoio de bases matemáticas consistentes, os efeitos da propagação de erros nos diferentes produtos que serão derivados das análises desses MDEs.

Os resultados reforçaram a importância da técnica InSAR para aplicações nos ambientes de florestas, pois as coberturas vegetais representam um severo obstáculo para mapeamento preciso do relevo por meio dos métodos da aerofotogrametria e da fotogrametria espacial, usando satélites de sensoriamento remoto, que operam na faixa óptica do espectro eletromagnético. Este problema é motivo para a carência de dados altimétricos da região amazônica onde a representação da topografia em escalas médias e grandes é muito inexpressiva, sendo um obstáculo ao desenvolvimento regional. Assim, os resultados do trabalho deram uma contribuição para estudo de caminhos alternativos que podem reduzir essa dependência. Mesmo que o estudo tenha sido restrito a um pequeno trecho da Amazônia, a metodologia pode ser estendida, com os ajustes necessários, para emprego em outras áreas com ocorrência de coberturas florestais.

Os procedimentos de avaliação e correção pesquisados se mostraram válidos, do ponto de vista da contribuição científica, pois se somam a outras ferramentas existentes para validação de técnicas capazes de produzir grandes quantidades de dados e informações para mapeamentos de recursos da Terra. A técnica InSAR agrega alto grau de automação, ampla cobertura geográfica e não depende de interferências atmosféricas. Portanto, o trabalho representou um pequeno esforço para suprimento da necessidade de constante investimento em métodos para melhorias de modelos de representação da superfície e de recursos da Terra.

Como foram utilizados muitos pontos de controle para treinamento e teste, todos os métodos e variações dos arranjos utilizados apresentaram bons resultados, indicados pelos parâmetros estatitiscos globais e locais, pelos mapas de precisão e pelos demais resultados das diferentes avaliações realizadas. Em quaisquer outros casos de estudo

sugere-se que, pelo menos, dois dos métodos de correção e avaliação sejam aplicados para ajustar dados de MDE, de modo que um método possa checar a validade do outro.

Foram identificados e tratados cerca de 12000 pontos (0,05%) do total de células da grade do MDE da banda P e cerca de 14000 pontos (0,06%) do MDE da banda X considerados *outliers*. Este tratamento preveniu a propagação de erros nos demais passos de avaliações do MDE, nas aplicações de cálculo do MDA e de determinação da biomassa acima do solo, além contribuir para tornar os modelos potencialmente mais úteis nas várias aplicações possíveis de análises derivadas de MDE que venham a ser feitas nestes modelos. Isto é importante porque mesmo pequenas quantidades de erros de altura podem afetar muito alguns produtos derivados de MDE, tais como acumulação de fluxos. índices de molhamento, curvaturas, rugosidades ou declividades. Subsequentemente, todas as interpretações que dependem desses cálculos são afetadas pelos erros propagados. Este resultado também mostrou a validade destas formas de tratamento interno aplicadas aos MDEs.

Pelas estimativas de erros globais e locais encontradas nos MDEs da FLONA Tapajós, o estudo mostrou que os produtos MDEs InSAR avaliados possuem boa qualidade geral, no entanto, sempre existem erros espaciais que precisam ser caracterizados e corrigidos. A qualidade interna, a consistência externa, a precisão e a exatidão dos MDEs devem ser testadas e especificadas previamente às aplicações de modelagem de terreno para extração de informações. Os resultados do trabalho mostraram que os métodos aplicados podem melhorar o aspecto quantitativo da análise do terreno fornecendo meios para caracterizar explicitamente erros de um MDE que ainda não tenham sido documentados previamente.

Os MDEs corrigidos por Moura (2005) apresentaram uma pequena superioridade em relação aos modelos corrigidos por Dutra et al. (2002) podendo, entretanto, ser considerados de qualidade similares. Os métodos do IQD e da triangulação com interpolação linear apresentaram os melhores indicadores gerais, podendo ser considerados de qualidades similares. Foram seguidos, em ordem decrescente de qualidade, pelos métodos de krigagem e *splines*, entretanto estes quatro métodos

estudados apresentaram qualidade superior aos originais corrigidos por Dutra et al. (2002) e Moura (2005).

Em resumo, o funcionamento integral da metodologia desenvolvida e aplicada produziu, de forma direta ou indireta, os seguintes resultados:

- Métodos que oferecem flexibilidade para ajuste e correção de modelos digitais de elevação existentes. Onde os algoritmos, programas e procedimentos finais desenvolvidos em linguagem IDL são compreensivos e documentados, de utilização simples e adaptável a novas necessidades.
- 2. Metodologia funcional que forneceu formas de verificação da qualidade dos modelos de elevação InSAR e produziu resultados satisfatórios nos modelos corrigidos. Com a metodologia os usuários finais de MDE ficam cientes do grau de exatidão dos modelos em uso, garantidos através de avaliação quantitativa baseada em modelos matemáticos e análise teórica.
- 3. Métodos que podem contribuir no atendimento ao crescente número de aplicações de MDE InSAR. Os procedimentos, algoritmos e programas desenvolvidos atendem também a MDEs não provenientes do método InSAR, além de se prestarem à resolução de alguns problemas gerais de correção de erros de superfícies 3D mediante adaptações adequadas.
- 4. Estudos que permitiram melhorar a compreensão da interação da radiação do espectro de microondas com alvos da Terra nas bandas P e X do radar, fornecendo respostas preliminares para questões importantes que ainda estão sujeitas a ativas pesquisas e, ainda, sem respostas definitivas. Especialmente em relação a áreas da terra cobertas por vegetação quanto ao retorno da banda P no nível do solo e quanto ao retorno da banda X no topo das copas das árvores.

## CAPÍTULO 6

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os MDEs, assim como quaisquer outras técnicas de mapeamento, são modelos que procuram representar numericamente determinada variável geográfica de uma área de interesse, mas como acontece em todos os modelos, afastam-se da realidade necessitando de avaliações e ajustes. As recentes e crescentes aplicações de análises de terreno mostram uma grande demanda por MDEs de qualidade, pois os resultados de sua aplicação são bastante eficazes e sua estruturação considerada entre as formas de dados espaciais mais reutilizáveis e duradouras. Este aspecto enfatiza muito a importância de mensurar, transformar e compreender os impactos da qualidade dos dados digitais de elevação nas atividades de modelagem de fenômenos e recursos da Terra, justificando pesquisas nessa área.

Devido à grande demanda atual por informações altimétricas para modelagem de dados da superfície da Terra, a produção de MDEs busca cada vez mais a utilização de técnicas produtivas, com alto grau de automação, como a interferometria SAR, ou a combinação desta técnica com os métodos de LIDAR e fotogrametria. O uso da tecnologia InSAR permite uma estimativa mais precisa do tempo de execução de um projeto de mapeamento devido à previsibilidade da aquisição dos dados, mesmo com cobertura de nuvens, condições atmosféricas desfavoráveis ou na ausência da luz do dia. Assim, estudos presentes e futuros nessa área de pesquisa são necessários e muito bem vindos.

A produção de MDE/MDT por técnicas InSAR apresenta, também, grande perspectiva de crescimento em um futuro próximo por conta de vários sistemas orbitais que estão sendo lançados ou com seus lançamentos previstos para horizontes breves. Tem havido também uma grande disseminação do uso de sistemas InSAR aerotransportados e isso é um fator de motivação para novos estudos envolvendo dados de MDEs InSAR.

Devido a algumas vantagens sobre os outros métodos de mapeamento e à possibilidade de uso de capacidades estendidas como multibandas (L, P, X e C) e polarimetria, o método InSAR tende a despertar interesse cada vez maior da comunidade de mapeamento de recursos da Terra. Em um cenário de expansão, com a possibilidade de

aplicações em programas de mapeamentos sistemáticos globais, nacionais e regionais, é importante que haja um domínio consolidado do conhecimento em termos de avaliação, precisão, registro e correção para compatibilizar o método InSAR com os padrões adotados nos mapeamentos cartográficos sistemáticos. Este é mais um ponto de motivação para incentivo a novas pesquisas nesta área cientifica.

À medida que as aplicações InSAR tornam-se cada vez mais requisitadas, cresce também a preocupação com a qualidade dos dados de elevação e com a propagação dos erros nas análises derivadas dos MDEs. Operações quantitativas baseadas em MDE são influenciadas, não somente pelo valor dos erros da elevação, mas também pela distribuição espacial desses erros (FISHER, 1998; HEUVELINK, 1998; ALBANI e KLINKENBERG, 2003). Cálculos de atributos do terreno compostos por valores baseados em um grande número de células no MDE são afetadas mais intensamente pelos erros de elevação. Mesmo pequenas quantidades de erros de altura podem afetar muitos os produtos derivados de MDE e subseqüentemente todas as interpretações que dependem desses cálculos. Este aspecto reforça a importância da continuidade dos estudos de erros e correções de MDE.

O desenvolvimento de estratégias para identificar, quantificar, reduzir, visualizar e compreender incertezas em MDE tem sido objeto de interesse constante nas comunidades de SIG. Portanto, as aplicações que dependem do suporte de MDE agregam qualidades importantes quando os dados de altitudes são submetidos a tratamentos de correções que melhoram sua qualidade como as técnicas que foram exploradas no presente estudo.

O tema de estudo e os resultados da pesquisa de tese buscam preencher uma lacuna importante que é a avaliação de MDE InSAR aerotransportado e procuram fornecer uma contribuição científica nesta área de pesquisa. A contribuição do trabalho se torna importantante devido à crescente aplicação de MDEs e técnicas InSAR no mapeamento e inventário de recursos da Terra, combinada à necessidade de correção de erros locais e globais que afetam esses dados. Modelos altimétricos mais corretos e confiáveis são desejáveis para qualquer aplicação de modelagem ou análise espacial em geral. Há

situações específicas que envolvem riscos e requerem alta precisão, como nas aplicações militares, de telecomunicações, e de navegação onde esses aspectos são essenciais.

Apesar dos esforços empreendidos neste trabalho de pesquisa, alguns problemas de erros e incorreções dos MDEs não foram completamente resolvidos pelos métodos aplicados. Portanto, como continuidade desta linha de pesquisa, novos estudos são sugeridos enfocando os seguintes tópicos:

- Melhorar os algoritmos e procedimentos para tratamento de *outliers* nos modelos de elevação, enfocando os ruídos em forma de linhas, na forma de áreas ou de objetos de formas complexas.
- 2) Tratar erros e ruídos que apresentem padrões sistemáticos e espacialmente correlacionados.
- 3) Aperfeiçoar e desenvolver novos métodos geométricos para correções tridimensionais de modelos digitais de elevação.
- Aperfeiçoar o emprego de novos procedimentos e funções matemáticas para interpolação de superfícies.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKCA, D. Full automatic registration of laser scanner point clouds. In: OPTICAL 3-D MEASUREMENT TECHNIQUES, 6.,2003. Zurich. **Proceedings...** Zurich: ISPRS, 2003. p. 330-337.
- ALBANI, M.; KLINKENBERG, B. A Spatial filter for the removal of striping artifacts in Digital Elevation Models. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,** v. 69, n. 7, p. 755–765, July 2003.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas.** Embrapa-SPI, Brasília, 1998. 434p.
- AUDETTE, M.A; FERRIE, F.P; PETERS, T.M. An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging. **Medical Image Analysis**, v. 4, p. 201-217, 2000.
- BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Inverse Problems**. v. 14, p. R1-R54, Bristol, UK, 1998.
- BOERNER, W. M.; YAMAGUSHI, Y. Extra wideband polarimetry, interferometry and polarimetric interferometry in Synthetic Aperture Radar, Invited paper, Special issues on advances in radar systems. **IEICE Transaction community**, v. E83-B, n. 9, Sept. 2000.
- BRASIL. **Decreto-lei n 89.817**, de 20/07/1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (NTCN), Diário Oficial da União, 22/07/1984.
- BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. **Principles of geographical Information Systems.** Oxford:: Clarendon, 1998. 333p.
- CACHIER, P; BARDINET, E; DORMONT, D; PENNEC, X; AYACHE, N. Iconic feature based nonrigid registration: the PASHA algorithm. **Computer Vision and Image Understanding**, v.89, p. 272-298. 2003.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 344 p. (INPE-10506-RPQ/249). Disponível em: <a href="http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43">http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.
- CASTELLANI, U; FUSIELLO, A; MURINO, V. Registration of multiple acoustic range views for underwater scene reconstruction. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 87, n.1/3, p. 78-89, 2002.
- CASTILHO, C. Variação espacial e temporal da biomassa arbórea viva em 64 km2 de floresta de terra-firme na Amazônia Central. 2004. 87p. Tese (Doutorado em Ecologia) Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus-AM. 2006.
- CLOUDE, R. S.; PAPATHANASSIOU, K. Polarimetric SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1551-1565, Sept. 1998.

- CURLANDER, J. C.; McDONOUGH, R. N. Synthetic aperture radar systems and signal processing. New york: John Wiley, 1991.
- De BOOR, C. A practical guide to splines. New York: Springer, 1978.
- DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; CLARK, D. B.; G. KNOX, R. G.; BLAIR, J. B.; HOFTON, M. A.; CHAZDON, R. L.; WEISHAMPEL, J. F.; PRINCE, S. D. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 305–319, 2002.
- DUTRA, L. V.; ELMIRO, M. T.; SOARES, B. S. F.; MURA J. C.; SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAÚJO, L. S.; ALBUQUERQUE, P. C. G.; VIEIRA, P. R.; GAMA, F. F. Assessment of Digital Elevation Models obtained in Brazilian Amazon based on P and X band Airborne Interferometric Data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS) June 24-28, 2002. Toronto, Canada. **Proceedings...**Toronto: IEEE, v.6, 2002. p.3614 3616.
- EBNER, H.; MUELLER, F. Processing of digital three line imagery using a generalized model for combined point determination. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 26, n. 3/1, p. 212-222, 1986.
- EBNER, H.; STRUNZ, G. Combined point determination using Digital Terrain Models as control information. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 27, n. n. B11/3, p. 578-587, 1988.
- El-SHEIMY, N. **Digital terrain modelling**. Calgary: The University of Calgary (ENGO 573), 1999.
- FARR, T.G.; KOBRICK, M. Mapping the world in 3-D: The Shuttle Radar Topography Mission. In: PECORAL4 LANDSATELLITE INFORMATION, 3, 1999, Denver. **Proceedings...** Denver, CO: [s.n], Dec. 1999.
- FISHER, P. Improved modeling of elevation error with geostatistics. **GeoInformatica**, v. 2, n. 3, p. 215–233, 1998.
- FOGEL, D.N. **MQReg Version 2.00. a computer program**. Santa Barbara, California: Department of Geography. University of California, 1995.
- FORNARO, G.; FRANCESCHETTI, G.; MARZOUK, E.S. A new approach for image registration in interferometric processing. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS). 1994, Pasadena. **Proceedings...** New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1994. p. 1983-1985
- FRANKE, R.; NIELSON, G.M. Scattered data interpolation: a tutorial and survey. In: HAGEN, H.; ROLLER, D. (eds.). **Geometric modeling:** methods and applications. Berlin: Springer-Verlag,1991, p. 131-160.
- FUSIELLO, A; CASTELLANI, U; RONCHETTI, L; MURINO, V. Model acquisition by registration of multiple acoustic range views. **Computer vision ECCV 2002.** [S.l]: Springer, v. 2351, 2002. p. 805-819. Lecture Notes in Computer Science

- GAMA, F. F. **Estudo da interferometria e polarimetria SAR em povoamentos florestais de eucalyptus SP**. 2007-02-13. 243 p. (INPE-14778-TDI/1231). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <a href="http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.04.12.36">http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.04.12.36</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.
- GENS, R.; GENDEREN, J.L. SAR interferometry, issues, techniques, applications, Review Article. **Interational Journal of Remote Sensing**, v.17, n. 10, p. 1803-1835, 1996.
- GHIGLIA, D. C. **Two-dimensional phase unwrapping** theory, algorithms and software. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- GHIGLIA, D. C.; MASTIN, G. A.; ROMERO L. A. Cellular-automata method for phase unwrapping. **Journal of optical society American**, v. 4, n. 1, p. 267-280, Jan. 1997.
- GHIGLIA, D. C.; ROMERO, L. A. Robust two dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. **Journal of optical society American**, v. 11, n. 1, p. 107-117, Jan. 1994.
- GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H.; WERNER, C. L. Satellite radar interferometry: two-dimentional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, Aug. 1988.
- GOSHTASBY, A. Registration of images with geometric distortion. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,** v. 26, n. 1, p. 60-64, 1988.
- GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **Proceedings of IEEE**, v. 62, n. 6, p. 763-768, June 1974.
- GRUEN, A. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. **South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography**, v.14, n. 3, p. 175-187, 1985.
- GRUEN, A; AKCA D. Least squares 3D surface matching. In: ASPRS ANNUAL CONFERENCE, 2005, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore, Maryland: ASPRS, 2005.
- HABIB, A.; GRANMA, M.; MITISHITA, E. Co-registration of photogrammetric and lidar data: methodology and case study. **Revista Brasileira de Cartografia**, v1, n.56, 2004.
- HANSSEN, R. F. Radar interferometry data interpretation and error analysis, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- HESS, L. L.; NOVO, E. M. L. M.; SLAYMAKER, D. M.; HOLT, J.; STEFFEN, C.; VALERIANO, D. M.; MERTES, L. A. K.; KRUG, T.; MELACK, J. M.; GASTIL, M.; HOLMES, C.; HAYWARD, C. Geocoded digital videography for validation of land cover mapping in the Amazon basin. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 7, 1527–1556, 2002.
- HEUVELINK, G.B.M. Error propagation in environmental modelling with GIS, London, United Kingdom: Taylor & Francis, 1998, 127 p.

- HODGSON, M.E.; JENSEN, J.R.; SCHMIDT, L.; SCHILL, S.; DAVIS, B. An evaluation of LIDAR and IFSAR derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 295–308, 2003.
- HOFMANN, C.; SCHWABISCH, M.; OCH, S.; WIMMER, C.; MOREIRA, J. Multipath P-band interferometry First results. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 21., June 21–24, 1999, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa, Canada, 1999.
- HOLECZ, F., MOREIRA, J., PASQUALI, P., VOIGT, S., MEIER, E., NUESCH, D. Height Model Generation, Automatic Geocoding and Mosaicing using Airborne AeS-1 InSARdata. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE & REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 1997, Singapure. **Proceedings...** Singapore:IEEE, 1997. p. 1929-1931.
- HOLMES, K. W.; CHADWICK, O. A.; KYRIAKIDIS, P. C. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. **Journal of Hydrology**, v. 233, p. 154-173, 2000.
- HOUGHTON, R. A., LAWRENCE, K. T., HACKLER, J. L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v.7, n.7, p. 731-746, Oct. 2001
- JOHNSON, A.E.; KANG, S.B. Registration and integration of textured 3D data. **Image and Vision Computing**, v. 17, n. 2, p. 135-147, 1999.
- KARRAS, G.E.; PETSA, E. DEM matching and detection of deformation in close-range Photogrammetry without control. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, 9, p. 1419-1424, 1993.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling:** principles and methodology, Florida, CRC Press, 2005.
- LAURANCE, W.F.; FEARNSIDE, P.M.; LAURANCE, S.G. DELAMONICA, P.; LOVEJOY, T.E.; RANKIN-DE-MERONA, J.M.; CHAMBERS, J.Q.; GASCON, C. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology Management**, v.118, n. 1-3, p. 127-138, June 1999.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. Remote sensing and image interpretation. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, , 1999.
- LIMA, A.J.N.; TEIXEIRA, L.M.; CARNEIRO, V.M.C.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Análise da estrutura e do estoque de fitomassa de uma floresta secundária da região de Manaus AM, dez anos após corte raso seguido de fogo. **Acta Amazônica**, Manaus, AM, v.37, 1, p. 49-54, 2007.
- LIN, Q.; VESECKY, J. F.; ZEBKER, H. A. Registration of interferometric SAR images. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS). 1991, Helsinki. **Proceedings...** New York: IEEE. p. 2173- 2176, 1991.

- MATOS, F.D.A.; KIRCHNER, F.F. Estimativa de biomassa da floresta ombrófila densa de terra firme na amazônia central com o satélite IKONOS II. **Floresta**, Curitiba, PR, v.38, n.1, jan./mar. 2008.
- MAAS, H.G. Least-Squares Matching with airborne laserscanning data in a TIN structure. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.33,n. 3A, p. 548-555, 2000.
- MAAS, H.G. On the use of pulse reflectance data for laserscanner strip adjustment. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 34, n. 3/W4, 2001.
- MAUNE, D. F. **Digital elevation model technologies and applications**. 2. ed. Bethesda, MD: ASPRS, 2007. 620 p.
- McDONOUGH, R. N.; RAFF, B. E.; KERR, J. L. Image formation from spaceborne synthetic aperture radar signals. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, v. 6, n.4, p. 300-312, 1985.
- MILLER, H. J. Tobler's first law and spatial analysis, **Annals of the Association of American Geographers**, v. 94, n. 2, p. 284–289, 2004.
- MITCHELL, H.L.; CHADWICK, R.G. Digital Photogrammetric concepts applied to surface deformation studies. **Geomatica**, v. 53, n. 4, p. 405-414, 1999.
- MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS. São Paulo: UNESP, 2000.
- MOORE, D. S.; McCABE, G. P. **Introduction to the practice of statistics**.3. ed. New York: W. H. Freeman, 1999.
- MOREIRA, J. Design of an Airborne Interferometric SAR for High Precision DEM Generation, In: ISPRS CONGRESS, 18., 1996, Wien. **Proceedings...** Wien: [s.n.], v. 21, part B2, 1996. P. 256-260.
- MOURA, P. Calibração dos modelos digitais de elevação gerados por interferometria SAR nas bandas PEX. 2005-03-28. 233 p. (INPE-15241-TDI/1328). Dissertação de Mestrado Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <a href="http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.01.19.41">http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.01.19.41</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.
- MURA, J. C.; CANDEIAS, A. L. B.; DUTRA, L. V.; MOREIRA J. R Evaluation of the phase noise reduction filters in SAR interferometry. In: LATINO-AMERICAN SEMINAR ON RADAR REMOTE SENSING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES, 1., 1997, Buenos Aires. **Proceedings...** Noordwjk: ESA, 1997. p. 43-46, SP-407.
- MURA, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico**: sistema Geo-InSAR. 2000-08. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000. Disponível em:
- <a href="http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24">http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24</a>. Acesso em: 21 jul. 2008.

MURA, J. C. Otimização da coerência de imagens SAR interferométricas e polarimétricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4163-4170. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12765-PRE/8055). Disponível em: <a href="http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.18">http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.18</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

NASCIMENTO, H.E.M.; LAURANCE, W.F. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforest: a landscapescale study. **Forest Ecology and Management**, v.168, p.311-321. 2002.

NEFF, T; DUTRA, L.V; SANTOS, J.R; FREITAS, C.C; ARAUJO, L.S. Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band radar backscatter. **Forest Science**, v. 51, n.6, p. 585-594, 2005.

NIKOLAIDIS, N; PITAS, I. **3-D image processing algorithms.** New York : John Wiley & Sons, 2001, 176p.

NIST/SEMATECH **e-Handbook of statistical methods**. Disponível em: <a href="http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/">http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/</a>>, Acesso em: 10 mar. /2007.

NUSS, W.A.; TITLEY, D.W. Use of multiquadric interpolation for meteorological objective analysis. **Monthly Weather Review,** v. 122, n. 7, p. 1611-1631, 1994.

OKABE, A.; BOOTS, B.; SUGIHARA, K. **Spatial tessellations:** concepts and applications of Voronoi diagrams. Chichester, England: Wiley & Sons, 1992.

OUARZEDDINE, M. S. Generation of digital terrain models using polarimetric SAR interferometry. 2002. MSc Thesis - ITC, Enschede, Netherlands, march 2002.

PASSINI, R.; BETZNER, D.; JACOBSEN, K. Filtering of digital elevation models, In: ASPRS ANNUAL CONVENTION, 2002, Washington. **Proceedings...** Washington: ASPRS, 2002.

PECKHAM, R. J.; GYOZO, J. **Digital terrain modelling:** development and applications in a policy support environment. [S.l]: Springer-Verlag, 2007. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography

PILGRIM, L. Robust estimation applied to surface matching. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 51, n. 5, p. 243-257, 1996.

PINHEIRO, T. F.; SOARES, J. V.; RENNÓ, C. D.; PIC, A. Análise da variação espacial da biomassa por imagens SAR simuladas para o MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR) em uma floresta de terra-firme da Amazônia Central. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1809-1816. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em:

<a href="http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.09">http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.09</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

POSTOLOV, Y.; KRUPNIK, A.; MCINTOSH, K. Registration of airborne laser data to surfaces generated by Photogrammetric means. **Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, n. 3/W14, p. 95-99, 1999.

- POTTMANN, H; LEOPOLDSEDER, S; HOFER, M. Registration without ICP. **Computer Vision and Image Understanding**, v.95, n.1, p. 54-71, 2004.
- REES, W.G. The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.1, p. 7-20, 2000.
- ROSENHOLM, D.; TORLEGARD, K. Three-dimensional absolute orientation of stereo models using Digital Elevation Models. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 1385-1389, 1988.
- ROUSSEEUW, P.J.; RUTS, I.; TUKEY, J.W. The Bagplot: A Bivariate Boxplot. **The American Statistician**. v. 53, n. 4, Nov. p, 382–387, 1999.
- SAGUÉS, L.; LOPEZ-SANCHEZ, J. M.; FORTUNY, J.; FÀBREGAS, X.; BROQUETAS, A.; SIEBER, A. J. Indoor experiments on polarimetric SAR Interferometry. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 38, n. 2, p. 671-684, Mar. 2000.
- SANTOS, J.R.; PARDI LACRUZ, M.S.; ARAUJO, L.S.; KEIL, M. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 7, p. 1217-1229, 2002.
- SANTOS, J.R.; FREITAS, C.C.; ARAUJO, L.S.; DUTRA, L.V.; MURA, J.C.; GAMA, F.F.; SOLER, L.S.; SANT'ANNA, S.J.S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 482-493, 2003.
- SENUS, W.J. Global Mapping Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). GLOBAL SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE CONFERENCE, 4., 2000, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town, South Africa: GSDI, Mar. 2000.
- SHEWCHUK, J. R. Lecture notes on Delaunay mesh generation. Berkeley, CA: Department of Electrical and Computer Science, University of California at Berkeley, 1999.
- SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.59, n. 1-2, p. 85-101, Aug. 2004.
- STEIN, M.L. **Interpolation of spatial data:** some theory for kriging. New York: Springer, 1999.
- SUN, G.; RANSON, K.J.; KHARUK, V.I.; KOVACS, K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter, **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 401–411, 2003.
- TIMBÓ ELMIRO, M. A. **Tecnicas de processamento digital de imagens para aplicacoes no mapeamento por carta-imagem**. fev. 1994. 116 p. (INPE-5546-TDI/532). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos campos. 1994. Disponível em: <a href="http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.02.40">http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.02.40</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

- TIMBÓ ELMIRO, M. A.; DUTRA, L. V.; MURA, J.C.; ALBUQUERQUE, P.C.G.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; ARAÚJO, L.S.; NEEF, T. Avaliação de Modelos Digitais de Terrenos e Modelos Digitais de Superfície Utilizando Metodologia InSAR de Duas Freqüências In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 21., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBC, 2003.
- TIMBÓ ELMIRO, M. A.; DUTRA, L.V.; MURA, J.C.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R. Avaliação de dados de altimetria da floresta amazônica baseados nas tecnologias INSAR, LIDAR e GPS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n.3, p. 233-246, 2006.
- TIMBÓ ELMIRO, M. A.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C. Correção de modelos de elevação INSAR através de superfícies de erros geradas por triangulação linear a partir de dados GPS e estações geodésicas eletrônicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5027-5034. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <a href="http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/10.12.21.05">http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/10.12.21.05</a>>. Acesso em: 21 jul. 2008.
- TIMBÓ ELMIRO, M. A.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C. Calibration of interferometric Synthetic Aperture Radar Digital Elevation Models (DEM) using error surface interpolation methods. In: URSI COMMISSION F TRIENNIAL OPEN SYMPOSIUM ON RADIO WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING, 11., 2007, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2007b. p. 163-169.
- TRUCCO, E.; VERRI, A. Introductory techniques for 3-D computer vision. [S.l.]: Prentice Hall, 1998. 343p.
- VANDEN WYNGAERD, J.; Van GOOL, L. Combining texture and shape for automatic crude patch registration. IEEE INT. CONFERENCE ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, 2003, Banff, Canada. **Proceedings...** Banff: IEEE, 2003. p. 179-186.
- WECHSLER, S.P. Perceptions of Digital Elevation Model Uncertainty by DEM users. **Urban and Regional Information Systems Association Journal**, v. 15, n. 2, 2003.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,** v. 54, p. 68–82, 1999.
- WEIK, S. Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information. In: IEEE INT. CONF. ON RECENT ADVANCES IN 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, 1997, Ottawa, Canada. **Proceedings...** Ottawa: IEEE, 1997. p. 93-100.
- WEYDAHL, D. J.; SAGSTUEN, J; DICK, O. B.; RONNING, H. SRTM DEM accuracy assessment over vegetated areas in Norway. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 16, p. 3513–3527, 2007.
- WIDAYATI, A.; LUSIANA, B.; SUYAMTO, D.; VERBIST, B. Uncertainty and effects of resolution of digital elevation model and its derived features: case study of Sumberjaya, Sumatera, Indonésia In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF

- PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2004, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: GITC, 2004.
- WOOD, J.D.; FISHER, P.F. Assessing interpolation accuracy in elevation models. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 13, n. 2, p. 48-56, 1993.
- XU, Z.; LI, Z. Least median of squares matching for automated detection of surface deformations. **Int.Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B3, p. 1000-1007, 2000.
- ZEBKER, H. A.; GOLDSTEIN, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar. **Journal of geophysical research**, v. 91, n. B5, p. 4993-4999, Apr. 1986.
- ZEBKER, H. A.; VILLASENOR J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959, Sept. 1992.
- ZEBKER, H. A.; LU Y. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least squares, and synthesis algorithms. **Journal of optical society American**, v. 15, n. 3, p. 586-598, Mar. 1998.
- ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. Advances in digital terrain analysis. The Netherlands: Springer-Verlag, 2008. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography

# **APÊNDICE A**

# TABELAS COMPLEMENTARES

 $Tabela\ A.1-Resumo\ de\ indicadores\ da\ qualidade\ local\ do\ MDE\ de\ Dutra\ et\ al.\ (2002).$ 

Banda P						Banda X					
Área	Mínimo	Máximo	Média	RMSE	Área	Mínimo	Máximo	Média	RMSE		
1	-3.007	4.482	0.259	3.378	1	-2.354	1.950	0.394	1.363		
2	-4.035	2.115	-0.970	1.845	2	-1.115	3.895	0.881	1.218		
3	-4.983	4.160	-1.494	3.605	3	-2.999	3.402	0.078	1.562		
4	-1.408	4.531	1.523	1.622	4	-3.884	2.194	-0.851	2.800		
5	-1.092	3.865	0.892	1.109	5	-0.639	3.717	1.900	1.038		
6	-2.540	3.427	0.546	2.510	6	-1.518	3.863	0.805	1.393		
7	-1.725	1.608	-0.330	0.951	7	1.336	1.840	1.003	0.862		
8	-4.597	-0.377	-0.986	1.007	8	-3.501	2.801	-0.162	2.422		
9	-3.399	0.112	-0.842	0.908	9	-3.598	3.942	0.274	3.377		
10	-2.090	-2.343	-1.100	0.604	10	-3.276	1.358	0.206	1.142		
11	-1.056	3.665	0.845	1.535	11	-3.828	1.496	-1.019	1.594		
12	-2.060	3.339	1.224	1.084	12	1.307	3.378	1.225	0.741		
13	-3.180	-1.054	-1.742	1.068	13	-3.446	-0.461	-1.533	1.275		
14	-1.094	4.033	0.684	1.427	14	-0.410	3.740	0.952	0.772		
15	-1.742	2.915	0.523	1.036	15	-3.847	0.021	-1.273	0.973		

 $Tabela\ A.2-Resumo\ de\ indicadores\ da\ qualidade\ local\ do\ MDE\ de\ Moura\ (2005).$ 

Banda P					Banda X					
Área	Mínimo	Máximo	Média	RMSE	Área	Mínimo	Máximo	Média	RMSE	
1	-2.706	4.034	0.234	3.040	1	-2.119	1.755	0.355	1.227	
2	-3.632	1.904	-0.874	1.661	2	-1.004	3.506	0.793	1.096	
3	-4.485	3.744	-1.345	3.245	3	-2.699	3.062	0.070	1.406	
4	-0.367	4.078	1.371	1.460	4	-3.496	1.075	-0.766	2.070	
5	-0.983	3.479	0.803	0.998	5	-0.575	3.345	1.710	0.934	
6	-2.286	3.084	0.491	1.539	6	-1.366	3.477	0.724	1.254	
7	-2.415	0.851	-0.462	0.911	7	0.504	2.760	1.505	0.543	
8	-4.137	-0.339	-0.888	0.906	8	-3.151	1.621	-0.146	1.730	
9	-3.059	0.101	-0.758	0.817	9	-3.238	2.828	0.246	2.859	
10	-2.717	-0.446	-1.430	0.655	10	-2.948	1.222	0.186	1.028	
11	-0.950	3.299	0.760	1.202	11	-3.445	1.346	-0.918	1.435	
12	-1.854	3.005	1.102	0.976	12	1.176	3.040	1.102	0.667	
13	-2.862	-0.949	-1.567	0.961	13	-3.101	-0.415	-1.379	1.148	
14	-0.985	3.630	0.616	1.284	14	-0.533	4.862	1.238	1.004	
15	-0.668	2.624	0.471	0.932	15	-3.462	0.019	-1.146	0.876	

Tabela A.3 – Resumo de indicadores da qualidade local do MDE P e X.

Banda P – IQD						Banda X - Triangulação Linear					
Área	Mínimo	Máximo	Média	RMSE	Área	Mínimo	Máximo	Média	RMSE		
1	-1.050	1.050	0.110	0.480	1	-1.581	2.694	0.195	1.074		
2	-0.570	0.110	-0.030	0.140	2	-2.862	0.555	-0.414	0.789		
3	-0.390	3.030	0.120	0.620	3	-1.389	1.713	-0.009	0.618		
4	-3.560	0.380	-0.260	1.230	4	-2.268	1.437	-0.090	0.801		
5	-3.090	2.760	-0.040	1.640	5	-4.377	1.593	-0.465	1.284		
6	-2.510	2.260	-0.010	0.690	6	-3.819	0.489	-0.270	1.371		
7	-0.020	0.670	0.070	0.180	7	-0.282	0.297	0.045	0.141		
8	-1.180	1.340	0.060	0.440	8	-2.079	1.953	-0.147	0.843		
9	-2.630	2.030	-0.050	0.520	9	-1.443	3.036	0.493	1.016		
10	-2.010	3.990	0.000	1.570	10	-0.354	2.169	0.162	0.594		
11	-1.590	0.060	-0.090	0.390	11	-0.501	2.178	0.186	0.573		
12	-1.330	0.640	-0.010	0.360	12	-0.981	2.151	0.015	0.558		
13	-0.020	2.040	0.510	1.020	13	-1.194	2.823	0.366	1.154		
14	-0.530	1.680	0.070	0.360	14	-0.681	0.801	0.021	0.300		
15	-1.850	0.660	-0.050	0.460	15	-2.949	3.353	0.018	1.365		

Tabela A.4 – Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método de Dutra etal. (2002) com os cinco arranjos da estrutura de controle.

MDE	Arranjo	RMSE	PEC	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.
				A	CNível	В	CNível	C	CNível
P	1	3.130	5.149	1:25000	9.4	1:20000	7.8	1:15000	6.3
	2	3.780	6.218	1:30000	11.3	1:25000	9.5	1:20000	7.6
	3	3.085	5.075	1:25000	9.3	1:20000	7.7	1:15000	6.2
	4	3.607	5.933	1:30000	10.8	1:20000	9.0	1:20000	7.2
	5	3.930	6.464	1:30000	11.8	1:25000	9.8	1:20000	7.9
X	1	2.968	4.882	1:20000	8.9	1:20000	7.4	1:15000	5.9
	2	3.378	5.556	1:25000	10.1	1:20000	8.4	1:15000	6.8
	3	2.959	4.867	1:20000	8.9	1:20000	7.4	1:15000	5.9
	4	3.337	5.489	1:25000	10.0	1:20000	8.3	1:15000	6.7
	5	3.526	5.800	1:25000	10.6	1:20000	8.8	1:20000	7.1

Tabela A.5 – Classificação dos MDEs segundo as NTCN, processados pelo método de Moura (2005) com os cinco arranjos da estrutura de controle.

MDE	Arranjo	RMSE	PEC	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.	Classe	Lm.Eq.
				A	CNível	В	CNível	C	CNível
	1	2.330	3.833	1:15000	7.0	1:15000	5.8	1:10000	4.7
	2	2.391	3.933	1:20000	7.2	1:15000	6.0	1:10000	4.8
P	3	1.356	2.230	1:8000	4.1	1:8000	3.4	1:80000	2.7
	4	2.363	3.887	1:20000	7.1	1:15000	5.9	1:10000	4.7
	5	2.413	3.969	1:20000	7.2	1:15000	6.0	1:10000	4.8
X	1	2.145	3.528	1:15000	6.4	1:10000	5.4	1:10000	4.3
	2	2.285	3.759	1:15000	6.9	1:15000	5.7	1:10000	4.6
	3	1.311	2.156	1:8000	3.9	1:18000	3.3	1:5000	2.6
	4	2.281	3.752	1:15000	6.8	1:15000	5.7	1:10000	4.6
	5	2.423	3.986	1:20000	7.3	1:15000	6.1	1:10000	4.8

#### ANEXO A

# CAPÍTULO II DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL (DECRETO LEI Nº 89.817, DE 20 DE JUNHO DE 1984)

Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA, usando da atribuição que lhe confere o artigo 81, item III, da Constituição e tendo em vista o disposto no artigo 2°, nos incisos 4 e 5 do artigo 5° e no artigo 18 do Decreto-lei n° 243, de 28 de fevereiro de 1967,

#### **DECRETA:**

## REGULADORAS DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL

•

## **CAPÍTULO II**

# ESPECIFICAÇÕES GERAIS

## SEÇÃO I

#### Classificação de uma Carta quanto à Exatidão.

- Art 8° As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, seguinte o critério abaixo indicado:
- 1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico estabelecido.

- 2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico estabelecido.
- § 1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.
- § 2° A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão PEC = 1,6449 EP.
- § 3° O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.
- § 4° Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

## SEÇÃO II

#### Classes de Cartas

Art 9° - As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

#### a - Classe A

- 1 Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
- 2 Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

### b - Classe B

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala, da carta,
 sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

#### c - Classe C

- 1 Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
- 2 Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.
- Art 10 É obrigatória a indicação da Classe no rodapé da folha, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação.
- § Único Os documentos cartográficos, não enquadrados nas classes especificadas no artigo anterior, devem conter no rodapé da folha a indicação obrigatória do Erro-Padrão verificado no processo de elaboração.
- Art 11 Nenhuma folha de carta será produzida a partir da ampliação de qualquer documento cartográfico.
- § 1° Excepcionalmente, quando isso se tornar absolutamente necessário, tal fato deverá constar explicitamente em cláusula contratual no termo de compromisso;
- § 2º Uma carta nas condições deste artigo será sempre classificada com exatidão inferior à do original, devendo constar obrigatoriamente no rodapé a indicação: "Carta ampliada, a partir de ( ... documento cartográfico ) em escala (... tal)".
- § 3° Não terá validade legal para fins de regularização fundiária ou de propriedade imóvel, a carta de que trata o " *caput* " do presente artigo.

# PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Manuais Técnicos (MAN)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

Publicações Didáticas (PUD)

São propostas de projetos técnico- Incluem apostilas, notas de aula e científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

manuais didáticos.

Publicações Seriadas

Programas de Computador (PDC)

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais códigos, expressos em uma linguagem de eventos (simpósios e congressos). publicações Constam destas Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e nado objetivo. São aceitos tanto definitivo para identificação de títulos programas fonte quanto executáveis. de seriados.

São a següência de instruções ou de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determi-

Pré-publicações (PRE)

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