



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.09.16.52 -TDI

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL  
PLANIALTIMÉTRICA DE PRODUTOS  
CARTOGRÁFICOS DA REGIÃO AMAZÔNICA  
EXTRAÍDOS DE DADOS SAR INTERFEROMÉTRICOS  
NAS BANDAS X E P DO SENSOR ORBISAR**

Carlos Alberto Stelle

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Corina da Costa Freitas, e Sidnei João Siqueira Sant'Anna, aprovada em 21 de novembro de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3APEMBS>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

**Membros:**

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

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

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

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

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

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

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

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.09.16.52 -TDI

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL  
PLANIALTIMÉTRICA DE PRODUTOS  
CARTOGRÁFICOS DA REGIÃO AMAZÔNICA  
EXTRAÍDOS DE DADOS SAR INTERFEROMÉTRICOS  
NAS BANDAS X E P DO SENSOR ORBISAR**

Carlos Alberto Stelle

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Corina da Costa Freitas, e Sidnei João Siqueira Sant'Anna, aprovada em 21 de novembro de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3APEMBS>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

St39a Stelle, Carlos Alberto.  
Avaliação da acurácia posicional planialtimétrica de produtos cartográficos da Região Amazônica extraídos de dados SAR interferométricos nas bandas X e P do sensor ORBISAR / Carlos Alberto Stelle. – São José dos Campos : INPE, 2011.  
xxviii + 138 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.09.16.52 -TDI)

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

Orientadores : Drs. Corina da Costa Freitas, e Sidnei João Siqueira Sant'Anna.

1. Radar de Abertura Sintética (SAR). 2. Modelo Digital do Terreno (MDT). 3. Ortoimagem. 4. Interferometria. 5. ORBISAR. 6. Avaliação Cartográfica. I.Título.

CDU 528.8.044.2(811.3)

---

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

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

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

Dr. Camilo Daleles Rennó



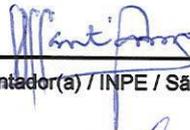
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Corina da Costa Freitas



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Antônio Henrique Correia



Convidado(a) / DSG / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): Carlos Alberto Stelle

São José dos Campos, 21 de novembro de 2011



Por mais singelas que sejam as nossas realizações, elas nunca podem partir exclusivamente de nós mesmos. Sempre há alguém e algo que contribui conosco, mesmo que seja em silêncio. E é sempre bom lembrar que ninguém sabe tanto a ponto de não precisar de esclarecimentos, e ninguém sabe tão pouco que não possa ensinar alguma coisa. Minha vida está repleta de mestres; os vejo todos os dias, em todas as circunstâncias, em todos os lugares. São ricos, pobres, humildes, cultos. Por esta realização, agradeço à força criadora do Universo e a todos os mestres, de ontem e de hoje, que estão em minha vida para a realização de um mundo mais justo e perfeito.



“Se enxerguei mais longe, foi porque  
me apoiei sobre os ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudo e cessão de suas instalações. À Diretoria de Serviço Geográfico – DSG, pela oportunidade e viabilidade financeira, ao Comando de Fronteira do Alto Rio Negro pelo apoio logístico e à OrbiSat da Amazônia Indústria e Aerolevanteamento S.A., pelo fornecimento dos insumos necessários à realização desta pesquisa.

Aos meus orientadores, Dra. Corina e Dr. Sidnei, pela generosidade em compartilhar conhecimentos, conselhos oportunos, tolerâncias com imprevistos da vida, paciência nas deliberações e, quando solicitados, sempre estarem presentes abdicando inúmeras vezes de seus momentos de descanso.

Ao Diretor de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro, General-de-Divisão Pedro Ronalt Vieira, pela confiança transmitida e oportunidade em realizar este trabalho.

Ao Major Antonio Henrique Correia, pelo apoio diuturno, confiança, orientações e conhecimento compartilhado.

A minha querida e amada esposa Cintia pela compreensão, companheirismo e sacrifício em cada passo de nossa jornada. Aos amados filhos Mateus e Ana Luísa que, com seus singelos olhares e gestos de amor, impulsionam-me e dão razão maior à minha existência.

A meus amados pais Luiz e Arlete, sempre presentes e sem os quais nada disso seria possível.

Aos militares envolvidos na logística do campo, Capitão Rogério e Tenente Vandro.

Aos militares envolvidos na execução do levantamento de campo, Sargentos Nelson, Roberto Dias e Rodrigo pela atenção, dedicação e receptividade; e aos Soldados Getúlio, Lopes, Damião, Menezes, Waltemar, Angenildo e Sampaio, que se destacaram na execução das tarefas mais árduas dessa atividade.

Ao Dr. Ponzoni, Coordenador Acadêmico, pela atenção, preocupação e conselhos oportunos, imprescindíveis à finalização desse trabalho.

Ao Engenheiro Gurgel pela sua sinceridade, experiência e amizade, imprescindíveis ao planejamento das tarefas de campo.

Aos amigos Cleber Gonzales, Rogério Galante, Orlando Zaloti, Giovanni Boggione e Marcus Saldanha que, pela incansável prestatividade, auxílio, companheirismo, orientações esclarecedoras, preciosos conselhos e oportunos socorros, facilitaram a execução das tarefas.

Aos amigos da Senzala Barreto, Flavia, Grazi, Eliana e Pires, pelo espírito de solidariedade.

## RESUMO

A Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) vem executando um dos maiores projetos de mapeamento do Brasil, denominado de “Radiografia da Amazônia”, na região conhecida como “Vazio Cartográfico da Amazônia Legal”. Essa área, de aproximadamente 1,8 milhões de km<sup>2</sup>, não possuía, até hoje, informações cartográficas terrestres adequadas em escalas maiores que 1:250.000, a não ser deficientes documentos cartográficos com a representação das feições cartográficas no nível da copa das árvores e não ao nível do solo. Nesse projeto estão sendo empregados radares de abertura sintética interferométricos e polarimétricos (PolInSAR) aerotransportados para obtenção de ortoimagens nas bandas X e P, o que possibilitará a elaboração de quase 20 mil produtos cartográficos nas escalas de 1:50.000 e 1:100.000. Com a finalidade de realizar a avaliação da acurácia posicional planialtimétrica de ortoimagens SAR e Modelos Digitais do Terreno (MDT), esse estudo baseou-se na comparação entre as coordenadas planialtimétricas medidas em campo e as extraídas diretamente destes produtos processados pela empresa OrbiSat que são oriundos do sensor OrbiSAR, considerando-se o uso e cobertura do solo e o gradiente de declividade como possíveis fatores que podem afetar essa acurácia posicional de um produto cartográfico. A área de estudo localiza-se no município de São Gabriel da Cachoeira-AM, foi dividida em regiões de características físicas homogêneas (estratos) e a avaliação desses produtos cartográficos foi realizada através dos resultados de testes estatísticos. Nessas condições esse trabalho é inédito. Para a coleta das amostras em campo foram utilizados rastreadores geodésicos de dupla-frequência (GPS) conjugados com Estação Total. Na análise planimétrica foram coletados 105 pontos identificáveis na ortoimagem na banda X e meticulosamente pré-selecionados, dos quais apenas 42 foram identificados inequivocamente na ortoimagem da banda P. O resultado da análise planimétrica mostrou que as ortoimagens nas bandas X e P apresentaram distorções geométricas apenas de translação de 14,36 m e 0,54 m nas direções Norte e Leste, respectivamente, e erro padrão igual a 0,39 m. Portanto, de acordo com as normas técnicas da cartografia brasileira, esses produtos atenderiam aos padrões cartográficos planimétricos da classe A na escala 1:50.000 e das classes B e C na escala 1:25.000. No entanto, corrigindo-se geometricamente as ortoimagens, estes produtos atenderiam aos padrões cartográficos das classes A, B e C nas escala 1:25.000. Na análise altimétrica, baseada no MDT oriundo das imagens InSAR da banda P, foram coletados 1047 pontos em 14 estratos distintos. A análise dos estratos resultantes da interação de classes de gradiente de declividade e de uso e ocupação do solo mostrou que os maiores erros de subestimação ocorrem, principalmente, no cruzamento dos estratos de gradiente de declividade *Ondulado* e *Montanhoso* com o estrato de uso e ocupação do solo *Solo Exposto*. Por outro lado, os maiores erros de superestimação estão nos estratos *Ondulado-Floresta* e *Montanhoso-Floresta* e as maiores dispersões nos estratos *Montanhoso-Pastagem*, *Montanhoso-Regeneração*, *Montanhoso-Floresta*. Assim, de acordo com normas técnicas da cartografia brasileira, o resultado da análise altimétrica sobre o MDT considerando a proporção de cada estrato na área de estudo, apresentou erro absoluto de 8,17m, atendendo aos padrões cartográficos das classes A, B e C na escala 1:50.000. Como resultado final, segundo essas normas os produtos cartográficos seriam enquadrados na escala 1:50.000 nas classes A, B ou C.



# HORIZONTAL AND VERTICAL POSITIONAL ACCURACY ASSESSMENT OF CARTOGRAPHIC PRODUCTS OF THE AMAZON REGION DERIVED FROM INTERFEROMETRIC SAR DATA IN X AND P BANDS FROM ORBISAR SENSOR

## ABSTRACT

The Geographic Service of the Brazilian Army (DSG) is running a major mapping project in Brazil, called "Radiography Amazon", the region known as "Empty Mapping the Amazon." This area, approximately 1,8 million km<sup>2</sup>, has not had, to date, appropriate land information mapping at scales larger than 1:250,000, except insufficient cartographic documents at the level of the tops of trees and not at ground level. In this project are being used Interferometric Synthetic Aperture Radars and Polarimetric (PolInSAR) for airborne imaging bands X and P, and thus are able to make the nearly 20,000 map products at scales of 1:50,000 and 1:10,000. In order to carry out the assessment of positional accuracy, this study was based on the comparison between the coordinates and altitudes obtained in the field and the products processed by OrbiSat and derived from X and P band from OrbiSar sensor, considering the land use and slope as possible factors that can affect the quality of the imaging. The study area is located in the municipality of São Gabriel da Cachoeira-AM, was divided into regions of homogeneous physical characteristics (strata) and the assessment of cartographic products was performed using the results of statistical tests. In these conditions this work is original. To collect the samples it was employed trackers geodetic dual-frequency methods for positioning and differential combined with the total station to the forest areas. For planimetric analysis 105 points were collected identifiable in the orthoimage band X and meticulously pre-selected. Of these only 42 were identified unambiguously in the P-band orthoimage. This sample showed geometric distortions (deviations) of approximately 14.36 m and 54 cm in the north and east, and the standard error of 0.39 that would meet the 1:50,000 (Class A) and 1:25,000 (Classes B and C), as Cartographic Accuracy Standard. Once removed the bias the result will be 1:25,000 (Classes A, B and C). For the analysis of the altimetric Digital Terrain Model (P-band) were collected 1047 points in 14 strata. The analysis of strata resulting from the interaction of classes of slope gradient and land use and soil showed that the greatest errors of underestimation occur mainly at the intersection of the strata slope gradient *ondulated* and *mountains* with layers of land use and Exposed soil. On the other hand, overestimation of the biggest errors are in the strata *ondulated-forest* and *mountainous-forest*, and higher dispersion in the strata *mountainous-pastures*, *mountain-regeneration*, *mountainous-forest*. Thus, according to Brazilian cartographic standards, the result of analysis on DTM (Digital Terrain Model) considering the proportion of each stratum in this study presented absolute error of 8.17 m, meeting the scale 1:50,000 for all classes. As a final result, cartographic products would be classified on the scale 1:50,000 for Classes A, B or C.



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Geometria de imageamento de um SAR .....	8
2.2	Distorções geométricas em imagens de radar .....	9
2.3	Imagens nas projeções <i>Slant Range</i> (A) e <i>Ground Range</i> (B) .....	10
2.4	Refletor instalado em (a) um local ideal e (b) sobre uma plataforma aquática, (c) exemplo de um sinal típico de um refletor em uma imagem SAR e metodologia de (d) sinalização do vôo radar e imageamento SAR nas direções (e) norte-sul e (f) leste-oeste .....	12
2.5	Geometria básica InSAR .....	15
2.6	Processamento InSAR .....	15
2.7	Ilustração da superposição entre as faixas .....	18
2.8	Superposição das áreas úteis para as Bandas X e P .....	19
2.9	Produção cartográfica .....	19
2.10	Gradiente de declividade e aspecto .....	20
2.11	GPS e o sistema de coordenada cartesiano .....	21
2.12	Segmentos do Sistema de Posicionamento Global .....	22
3.1	Área de estudo: (a) localização do município e (b) carta imagem gerada na banda X (polarização HH).....	40
3.2	Modelo digital: (a) do terreno (MDT) e (b) de superfície (MDS).....	42
3.3	Ortoimagens: (a) banda X (HH), (b) banda P (HH), (c) banda P (HV), (d) banda P (VH) e (e) banda P (VV) .....	43
3.4	Fluxograma das etapas de trabalho .....	45
3.5	Localização da estação de referência dentro da área de estudo .....	50
3.6	Localização de pontos medidos em campo .....	54
3.7	Etapas da análise planimétrica dos dados .....	55
3.8	Etapas da análise altimétrica dos dados .....	55
4.1	Localização dos 105 pontos para a análise planimétrica sobre a imagem banda X .....	61
4.2	Referencial para o cálculo dos resíduos .....	62
4.3	Levantamento no modo cinemático na ortoimagem na banda X .....	66
5.1	Mapa de classes de gradiente de declividade da área de estudo .....	75
5.2	Mapa de classes de uso e cobertura do solo da área de estudo .....	76
5.3	Mapa de estratos da área de estudo .....	77

5.4	MDT mostrando áreas sem informação altimétrica (em preto) .....	78
5.5	Localização das 3 nuvens de pontos sobre a ortoimagem na banda X .....	81
5.6	Nuvem 3: (a) localização dos pontos medidos, e (b) Gráfico dos erros altimétricos <i>versus</i> distância do ponto à Estação Total .....	82
5.7	Nuvem 2: (a) localização dos pontos medidos, e (b) Gráfico dos erros altimétricos <i>versus</i> distância do ponto à Estação Total .....	83
5.8	Nuvem 1: (a) localização dos pontos medidos, e (b) Gráfico dos erros altimétricos <i>versus</i> distância do ponto à Estação Total.....	84
5.9	Localização dos 1047 pontos para a análise altimétrica sobre a ortoimagem da banda .....	86
5.10	Altitudes medidas em campo e extraídas do MDT da banda P para cada estrato, com os respectivos intervalos com 95% de confiança .....	88
5.11	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS, reta de regressão estimada e o coeficiente de correlação .....	89
5.12	Histograma dos erros altimétricos com resultado do teste Shapiro-Wilks .....	90
5.13	Diagramas de dispersão dos erros do MDT para a categoria gradiente de declividade .....	94
5.14	Diagrama de dispersão dos erros do MDT em função da altitude obtida com GPS, para (a) todas as amostras, e para as amostras das classes de gradiente de declividade (b) <i>Plano</i> , (c) <i>Ondulado</i> e (d) <i>Montanhoso</i> .....	95
5.15	<i>Box-Plot</i> dos erros do MDT para os diferentes gradientes de declividade .....	96
5.16	Histograma dos erros do modelo digital da banda P para as classes de gradientes de declividade: (a) <i>Plano</i> , (b) <i>Ondulado</i> e (c) <i>Montanhoso</i> .....	97
5.17	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS, para as diferentes classes de uso e ocupação do solo .....	99
5.18	Diagrama de dispersão dos erros do MDT e do GPS, para (a) todas as amostras; e para as amostras das classes de uso e ocupação do solo: (b) <i>Solo Exposto</i> , (c) <i>Pastagem</i> , (d) <i>Regeneração</i> , (e) <i>Floresta</i> , e (f) <i>Área Urbana</i> .....	100
5.19	<i>Box-Plot</i> dos erros do MDT para os diferentes uso e ocupação do solo .....	101
5.20	Histograma dos erros do modelo digital da banda P para as classes de uso e ocupação do solo: (a) <i>Solo Exposto</i> , (b) <i>Pastagem</i> , (c) <i>Regeneração</i> , (d) <i>Floresta</i> e (e) <i>Área Urbana</i> .....	102
5.21	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS para os diferentes (a) gradientes de declividade, (b) uso e ocupação do solo e (c) estratos de declividade/uso e ocupação do solo .....	105
5.22	Erros do MDT <i>versus</i> altitude GPS para os estratos .....	106
5.23	<i>Box-plots</i> dos erros do MDT .....	107

5.24	Evolução e nova nomenclatura dos estratos agrupados na classe de gradiente de declividade .....	108
5.25	Condições de levantamento em área urbana .....	109
5.26	<i>Box Plots</i> dos erros dos estratos após agrupamentos .....	110



## LISTA DE TABELAS

2.1	Faixa de micro-ondas empregadas em radar .....	7
2.2	Padrões de exatidão planimétrica .....	28
2.3	Padrões de exatidão altimétrica .....	28
2.4	Valores máximos das escalas de mapeamento sistemático planimétrico .....	28
2.5	Valores máximos das escalas de mapeamento sistemático altimétrico .....	29
2.6	Relação entre NSSDA e ASPRS .....	32
3.1	Classes de gradiente de declividade proposta por De Biase (1993) .....	47
3.2	Classes de gradiente de declividade empregadas .....	48
3.3	Precisão do receptor Trimble L1/L2 empregado .....	51
3.4	Precisão da Estação Total Topcon série CTS-3000 empregada .....	52
4.1	Coordenadas e resíduos dos pontos de avaliação planimétrica .....	62
4.2	Estatística descritiva dos resíduos da ortoimagem banda X (HH) .....	65
4.3	Parâmetros da Transformação Afim .....	67
4.4	Resíduos dos Pontos de Controle e Pontos de Verificação .....	68
4.5	Estatística descritiva dos resíduos da ortoimagem banda P (HH) .....	69
4.6	Teste $t$ para as ortoimagens banda X (HH) e P (HH) .....	69
4.7	Estatística descritiva e resultado da análise de tendência ortoimagem banda X (HH) .....	70
4.8	Estatística descritiva e resultado da análise de precisão da ortoimagem banda X (HH) .....	70
4.9	Comparação dos resultados da análise planimétrica .....	72
5.1	Percentual das áreas dos estratos presentes na área de estudo.....	79
5.2	Número e estrato dos pontos medidos na classe Sem informação da declividade .....	80
5.3	Estatística descritiva das nuvens de pontos .....	85
5.4	Número de pontos medidos em campo para a análise altimétrica .....	87
5.5	Valores médios e desvios padrões das altitudes medidas em campo (GPS) e obtidas do MDT da banda P .....	87
5.6	Resultados da regressão linear das altitudes do MDT e do GPS .....	90
5.7	Estatística descritiva e resultado da análise de tendência do MDT .....	91
5.8	Resultado dos testes $\chi^2$ para a análise de precisão do MDT .....	91

5.9	Estatísticas descritivas para os erros do modelo digital da banda P, segundo as classes de gradiente de declividade .....	93
5.10	Enquadramento nos padrões cartográficos segundo as classes de gradiente de declividade .....	98
5.11	Estatísticas descritivas para os erros do modelo digital da banda P, segundo as classes de uso e ocupação do solo .....	98
5.12	Enquadramento nos padrões cartográficos, segundo as classes de uso e ocupação do solo .....	103
5.13	Estatísticas descritivas para os erros do MDT da banda P, segundo os estratos .....	104
5.14	Estatística descritiva para os estratos agrupados .....	110
5.15	Enquadramento nos padrões cartográficos, após o agrupamento dos estratos .....	111
5.16	Proporções de cada estrato na área de estudo, seus respectivos erros médios e MSEs .....	113

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	- Ângulo de declividade do terreno
$\beta$	- Ângulo de depressão
$\theta$	- Ângulo de incidência
$\lambda$	- Comprimento de onda
ha	- Hectare
HH	- Polarização horizontal-horizontal
HV	- Polarização horizontal-vertical
VH	- Polarização vertical-horizontal
VV	- Polarização vertical-vertical
B	- Linha de base
$\Delta\phi$	- Diferença de fase interferométrica
S <sub>1</sub>	- Antena 1
S <sub>2</sub>	- Antena 2
$\Delta r$	- Variação de distância de um mesmo elemento de resolução do terreno às antenas



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	- Avaliação da Altimetria
Ag	- Corpos d'água
ANOVA	- <i>Analysis of Variance</i>
ASPRS	- <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
ASTER	- <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
Au	- Área urbana
C	- Banda C de micro-ondas
C/A	- Código Civil GPS (modulado em L1)
CBERS	- <i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CCRS	- <i>Canada Centre for Remote Sensing</i>
CENSIPAM	- Centro Gestor Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
CPRM	- Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DEC	- Denominador da Escala da Carta
DGPS	- <i>Differential GPS</i>
Di	- Distância
DL	- Divisão de Levantamento
DoD	- <i>Department of Defense</i>
DP	- Desvio padrão
DSG	- Diretoria de Serviço Geográfico
$\varepsilon$	- Erro, discrepância ou resíduo
EB	- Exército Brasileiro
ENVI	- <i>Environment for Visualizing Images</i>
EP	- Erro padrão
ERS-1	- <i>European Remote-Sensing Satellite</i>
EPPEC	- Erro-padrão estabelecido pelo Padrão de Exatidão Cartográfica
eq	- Equidistância
Fl	- Floresta
FGDC	- <i>Federal Geographic Data Committee</i>

GPS	- <i>Global Positioning System</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEAv	- Instituto de Estudos Avançados
IDL	- <i>Interactive Data Language</i>
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	- <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
JERS	- <i>Japan Earth Resources Satellite</i>
K	- Banda K de micro-ondas
L	- Banda L de micro-ondas
L1	- Frequencia GPS (1575,42 MHz)
L2	- Frequencia GPS (1227,60 MHz)
L2C	- Código Civil GPS (modulado em L2)
LIDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
LISS	- <i>Linear Imaging Self-Scanner</i>
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDT	- Modelo Digital do Terreno
Mo	- Montanhoso
n	- Número de pontos
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSTAR-GPS	- <i>Navigation Sattelite with Timing and Ranging – Global Positioning System</i>
NSSDA	- <i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
Nu	- Nuvem
OM	- Organização Militar
On	- Ondulado
P	- Banda P de micro-ondas, ou Código preciso GPS, ou Avaliação da planimetria
Pa	- Pastagem
PAS	- Plano Amazônia Sustentável
PEC	- Padrão de Exatidão Cartográfica
PI	- Plano
ppm	- Parte por milhão

PRODES	- Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite
Rg	- Regeneração
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMSE	- <i>Root Mean Square Error</i>
RTK	- <i>Real Time Kinematic</i>
S	- Banda S de micro-ondas
SAR	- <i>Synthetic Aperture Radar</i>
Sd	- Sem informação de declividade
Se	- Solo exposto
SLC	- <i>Single Look Complex</i>
So	- Sombra
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SVM	- <i>Support Vectors Machine</i>
TM	- <i>Thematic Mapper</i>
UTM	- Universal Transversa de Mercator
X	- Banda X de micro-ondas
WGS-84	- <i>World Geodetic System - 1984</i>
Y	- Código P GPS criptografado



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Objetivos .....	3
<b>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Princípios de Radar Imageador .....	7
2.2 Projeto Radiografia da Amazônia .....	11
2.2.1 Aerolevanteamento SAR e de Apoio de Campo .....	11
2.2.2 Metodologia de Processamento das Imagens SAR .....	13
2.3 Gradiente de Declividade e Aspecto .....	19
2.4 Sistema de Posicionamento Global .....	20
2.4.1 Técnicas de Posicionamento .....	23
2.5 Acurácia Posicional de Produtos Cartográficos .....	24
2.5.1 Normas Técnicas da Cartografia Brasileira - PEC.....	26
2.5.2 Normas Técnicas da Cartografia Norte-Americana.....	29
2.5.3 Análise de Tendência e Precisão.....	32
2.6 Características das feições que podem influenciar a acurácia posicional do MDT Interferométrico .....	36
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 Descrição da Área de Estudo .....	39
3.2 Materiais Empregados .....	41
3.3 Método .....	45
3.3.1 Geração do Banco de Dados .....	45
3.3.2 Estratificação da Área De Estudo .....	46
3.3.2.1 Classes de Uso e Cobertura do Solo .....	46
3.3.2.2 Classes de Declividade .....	47
3.3.2.3 Cruzamento das categorias .....	48
3.4 Amostragem .....	49
3.5 Levantamento de Campo .....	50
3.6 Análise dos Dados .....	54
3.6.1 Análise Planimétrica .....	56
3.6.2 Análise Altimétrica .....	57
<b>CAPÍTULO 4 – ANÁLISE PLANIMÉTRICA .....</b>	<b>61</b>
4.1 Análise Descritiva dos Pontos Planimétricos .....	61
4.2 Análise de Tendência e Precisão .....	70
4.3 Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira	71
4.4 Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas do NSSDA .....	71
4.5 Comparação dos resultados .....	72
<b>CAPÍTULO 5 – ANÁLISE ALTIMÉTRICA .....</b>	<b>73</b>
5.1 Estratificação da Área de Estudo.....	73
5.2 Áreas sem Informação Altimétrica no MDT.....	79
5.3 Análise Descritiva dos Pontos Altimétricos .....	80
5.3.1 Nuvens de Pontos.....	81
5.3.2 Pontos para Avaliação Altimétrica por Estratos .....	86

5.4	Análise de Tendência e Precisão .....	91
5.5	Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira	92
5.6	Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas do NSSDA .....	92
5.7	Análise por Estratos .....	92
5.7.1	Classes de Gradiente de Declividade .....	93
5.7.2	Classes de Uso e Ocupação do Solo .....	98
5.7.3	Estratos resultantes da interação de classes de gradiente de declividade e de uso e ocupação do solo .....	103
5.8	Análise considerando a proporção de cada estrato .....	111
	<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>115</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A – Caderneta de Campo .....</b>	<b>129</b>
	<b>APÊNDICE B – Alguns tipos de estratos .....</b>	<b>135</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

A situação atual da cartografia indica que, para muitas regiões do planeta, não existem documentos cartográficos que forneçam informação com a qualidade adequada para atender determinados fins (ESTES; MOONEYHAN, 1994).

Nesse contexto, a região amazônica, dada as suas características especiais, destaca-se entre as prioridades do governo brasileiro. Seus problemas são tão grandes e complexos quanto a dimensão da região. A Amazônia Legal possui uma área total de 5,2 milhões de km<sup>2</sup> e é uma região de grande interesse econômico e estratégico. Desse total, cerca de 1,8 milhão de km<sup>2</sup>, aproximadamente 35% da área total ou 606 folhas na escala 1:100.000, não possuem informações cartográficas terrestres adequadas em escalas maiores que 1:250.000, sendo conhecida como região do “vazio cartográfico”. Esse deficiente mapeamento existente é composto por documentos cartográficos que nem sempre representam as feições planialtimétricas no nível do solo, e sim no nível da copa das árvores. Ressalta-se ainda que a cartografia náutica encontra-se desatualizada e pouco se tem levantado sobre os recursos minerais existentes na região.

Para atender a crescente necessidade de elaborar e atualizar produtos cartográficos para diversas escalas é necessário desenvolver soluções tecnológicas que possam atender estas demandas, tanto em custo como em qualidade (MURA, 2000).

Uma alternativa para suprir essa necessidade é a utilização de dados de sensores remotos orbitais ou aerotransportados, que permitem obter informações em escalas global e local respectivamente, de forma sistemática, com intervalo de tempo regular e a baixo custo, se comparados com outros recursos como a fotogrametria e os levantamentos topográficos (GABOARDI, 2002). Outra vantagem às já citadas consiste na obtenção de informações sobre regiões de difícil acesso como áreas montanhosas e florestas tropicais.

Os sensores remotos ópticos geram imagens de fácil interpretação, no entanto estas imagens são muito vulneráveis às condições atmosféricas. Nesse aspecto os sensores que operam na faixa de micro-ondas são menos suscetíveis e surgem como uma solução tecnológica para viabilizar o mapeamento do terreno localizado abaixo da constante camada de nuvens presente na região amazônica. O radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) operado na banda P demonstrou ser uma alternativa tecnológica viável para o mapeamento do terreno sob a densa floresta amazônica, pois segundo Correia (2011) a interação da onda eletromagnética, nesta banda, pode ocorrer ao nível do solo.

Dutra et al. (2002) citam ser possível medir a altura do dossel de floresta tropical primária a partir da altura interferométrica, que corresponde à diferença dos modelos interferométricos nas bandas P e X. Isso ocorre pois a onda eletromagnética correspondente a banda X, é refletida ao atingir o topo da cobertura vegetal, ao passo que a banda P tem potencial de interagir com o solo sob a floresta

Os resultados obtidos em aplicações cartográficas baseadas no uso da tecnologia de radares interferométricos, nas bandas X e P (DSG, 2000; Dutra et al., 2002), aliado ao grande interesse no mapeamento da Amazônia, onde se destaca o Plano Amazônia Sustentável (PAS), integrado por ações de dez ministérios evidencia a prioridade do desenvolvimento sustentável da Amazônia pelo governo brasileiro. Esses fatores foram decisivos para a aprovação, no ano de 2008, do Subprojeto Cartografia Terrestre (CENSIPAM, 2008), também conhecido como “Projeto Radiografia da Amazônia”. Este integra o Projeto de Cartografia da Amazônia e foi instituído no âmbito do Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República, por intermédio da Portaria nº 07, de 09 de junho de 2005, para elaborar propostas para o Levantamento Estratégico Integrado para a Amazônia.

Realizado em parceria com Exército, Marinha, Aeronáutica e o Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM), esse projeto prevê investimentos de R\$ 350 milhões e desmembra-se ainda em outros dois subprojetos: Cartografia Geológica e Cartografia Náutica. Objetivam não apenas cobrir e corrigir o

vazio cartográfico da região amazônica, mas também dar suporte a projetos de infraestrutura a serem implantados na região e geração de informações estratégicas.

O Subprojeto Cartografia Terrestre, sob a responsabilidade de execução da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), tem por objetivo elaborar aproximadamente 20.000 produtos cartográficos planialtimétricos nas escalas 1:100.000 e 1:50.000 como cartas topográficas, ortoimagens SAR, modelos de digitais de elevação e modelos de estratificação vegetal. A região do vazio cartográfico da Amazônia Legal é constituída por 1.142.000 km<sup>2</sup> de áreas de floresta tropical densa e por 658.000 km<sup>2</sup> de áreas de não-floresta (campos naturais e áreas antropizadas). O mapeamento planialtimétrico das áreas de floresta teve início em 2008, por intermédio do aerolevante SAR interferométrico nas bandas X e P, sob a responsabilidade de execução pela empresa OrbiSat da Amazônia Ind. e Aerolevante S.A. Por outro lado, o mapeamento planialtimétrico das áreas de não-floresta será executado pela Força Aérea Brasileira com as aeronaves R99-B, a partir do aerolevante SAR interferométrico nas bandas X e L e executado.

Esta dissertação de Mestrado se insere nos objetivos do Subprojeto Cartografia Terrestre, pois visa avaliar a acurácia posicional de alguns produtos processados pela empresa OrbiSat que são oriundos do sensor OrbiSAR. Desta forma, esta dissertação subsidiará a DSG na tarefa de elaboração dos produtos cartográficos da região do vazio cartográfico da Amazônia Legal.

## **1.2 Objetivos**

Aproveitando as possibilidades de pesquisa a partir dos produtos gerados no Subprojeto Cartografia Terrestre e tendo por área de estudo o Município de São Gabriel da Cachoeira, localizado no noroeste do Estado do Amazonas, o objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar a acurácia posicional planimétrica das ortoimagens nas bandas X e P, assim com a acurácia posicional altimétrica do modelo digital do terreno (MDT) obtido na banda P.

Para tal, serão utilizados dados de referência de amostras coletadas em campo com o uso de receptores do sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS) e de Estação Total. Os dados serão tratados estatisticamente e terão sua análise direcionada à classificação dos produtos cartográficos de acordo com as normas técnicas nacionais e internacionais da cartografia.

Para alcançar esse objetivo, este trabalho foi dividido em fases que definem os objetivos específicos:

1. Empregar pontos GPS isolados para avaliação da acurácia posicional planimétrica das ortoimagens nas bandas X e P;
2. Identificar possíveis problemas presentes nas ortoimagens geradas nas bandas X e P e no MDT;
3. Empregar conjunto de pontos obtidos em diferentes estratos para avaliação da acurácia posicional altimétrica do MDT;
4. Identificar, a partir da análise dos estratos existentes na área de estudo, os possíveis fatores que podem influenciar na acurácia e precisão do MDT da banda P;
5. Considerar as proporcionalidades de cada estrato, obtidas a partir das classificações, visando ter a priori uma estimativa da precisão do produto cartográfico;
6. Classificar os produtos em conformidade com as normas técnicas da cartografia.

Para apresentar os fundamentos teóricos, a metodologia a ser utilizada, os resultados obtidos e as conclusões, este trabalho está dividido nos capítulos abaixo descritos.

No Capítulo 2 são apresentadas os fundamentos teóricos, os conceitos usados, as definições básicas iniciais e, no âmbito do Projeto Radiografia da Amazônia, as metodologias de aerolevanteamento SAR, de apoio de campo, de processamento das imagens e de produção cartográfica com imagens interferométricas SAR.

No Capítulo 3 é descrita a área de estudo bem como os materiais e os métodos utilizados.

Nos Capítulos 4 e 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para avaliação da acurácia posicional planimétrica e altimétrica, respectivamente.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações resultantes deste trabalho.

No Apêndice A é apresentada a Caderneta de Campo elaborada para as atividades de levantamento.

No Apêndice B são apresentadas fotografias tomadas durante a medição de alguns pontos para as avaliações.



## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são tratados os fundamentos, os conceitos usados, as definições básicas e no âmbito do Projeto Radiografia da Amazônia, as metodologias de aerolevanteamento SAR, de apoio de campo, de processamento das imagens e de produção cartográfica com imagens interferométricas SAR.

#### 2.1 Princípios de Radar Imageador

O princípio de funcionamento do radar baseia-se na emissão, por uma antena, de pulsos eletromagnéticos que se propagam até o alvo. Parte da energia transmitida é retroespalhada pelo alvo, retornando ao sensor, sendo, então, captado pela antena receptora e registrados a intensidade e o tempo de retorno do sinal (HENDERSON; LEWIS, 1998).

O radar opera em bandas específicas da faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético num intervalo de comprimento de onda que varia aproximadamente entre 1 cm a 1 m (ULABY et al., 1981). As principais faixas de frequências usadas no imageamento por radar, seus respectivos comprimentos de onda e suas denominações são apresentadas na Tabela 2.1. Comparado aos sensores ópticos, a menor interferência das condições atmosféricas no sinal de radar deve-se principalmente às dimensões do comprimento de onda, tornando-o propício para aplicações em regiões tropicais pois possibilita o imageamento com penetrabilidade na vegetação (CORREIA, 2009).

Tabela 2.1 - Faixas de micro-ondas empregadas no imageamento por radar.

Banda	Faixa de Comprimento (cm)	Frequência (GHz)
K	1,1-1,67	26,5-18,0
X	2,4-3,75	12,5-8,0
C	3,75-7,5	8,0-4,0
S	7,5-15	4,0-2,0
L	15-30	2,0-1,0
P	30-100	1,0-0,3

FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000).

Os radares de abertura sintética são sensores de visada lateral, cuja geometria de imageamento é mostrada na Figura 2.1. Durante o imageamento de uma determinada faixa no terreno a dimensão na direção da linha de voo (*along track*) ou longitudinal é denominada azimute (*azimuth*) e a dimensão ortogonal ou transversal é denominada alcance (*range*). Na faixa de terreno imageado a região mais próxima ao sensor (região que ocorre as primeiras interações da onda eletromagnética com o terreno) é chamada de alcance próximo (*near range*), enquanto a região mais afastada do sensor é conhecida como alcance distante (*far range*).

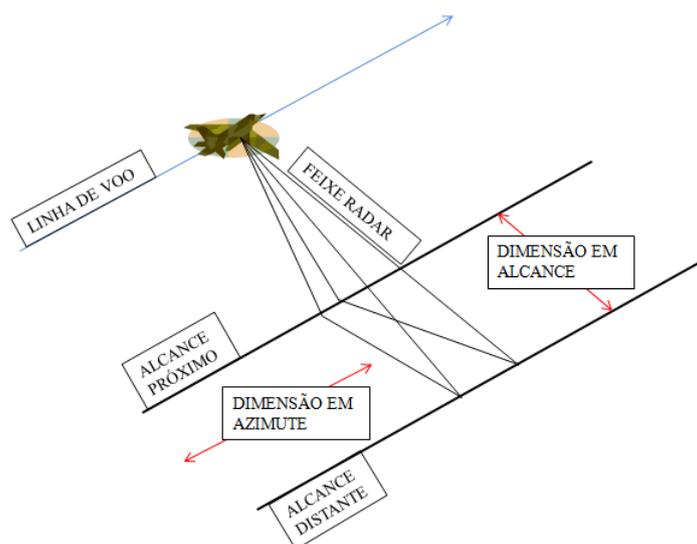


Figura 2.1 - Geometria de imageamento de um SAR.

O radar, dada sua geometria de imageamento e por medirem distâncias, podem gerar imagens com certas degradações. As principais degradações encontradas nas imagens de radar são as distorções geométricas e radiométricas (DUTRA et. al, 2003). Os dois tipos de distorções radiométricas mais comumente encontradas em imagens de radar são aquelas causadas pelo padrão de radiação da antena e pelo ruído *speckle*, que é inerente a sistemas que operam com iluminação coerente. O padrão de radiação da antena e a geometria de imageamento podem causar uma variação gradual do sinal de retorno na direção perpendicular ao voo, podendo ser observada na imagem como valores de níveis de cinza mais altos próximos ao *near range* e mais baixos próximos ao *far range*.

O *speckle* gera na imagem uma aparência granular (mudanças bruscas de níveis de cinza de um *pixel* para outro). Este ruído é causado pela característica coerente do sensor, pois a amplitude e a fase do sinal de retorno são resultantes de uma soma vetorial (coerente) dos sinais de retorno de vários difusores elementares contidos em cada célula de resolução. A fase do sinal retroespalhado por cada difusor elementar está relacionada à distância entre o difusor e o sensor. Se o sensor se move, estas fases mudarão, acarretando uma alteração na amplitude total do sinal.

Dentre as distorções geométricas, podem-se citar as relativas às variações nos movimentos da plataforma, a intrínseca à geometria de imageamento e à formação das imagens, e as três principais referentes às dimensões dos alvos imageados: sombreado (*shadowing*), inversão de relevo (*layover*) e encurtamento de rampa (*foreshortening*). Estes três últimos tipos de distorção geométrica são ilustrados na Figura 2.2, onde o sombreado, a inversão de relevo e o encurtamento de rampa são representados, respectivamente, pelos trechos A-C e F-G, B-A e E-F.

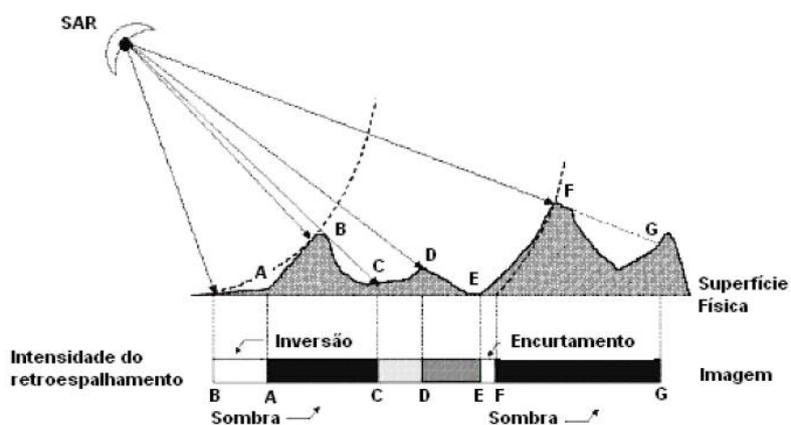


Figura 2.2 – Distorções geométricas em imagens de radar.

FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000).

Ao contrário do sensor óptico, o deslocamento de determinada feição na imagem devido ao relevo é maior quanto mais próximo o alvo se encontra da fonte de transmissão. Deve-se observar que, especialmente em terreno montanhoso, quanto menor for o ângulo de incidência da onda eletromagnética do sinal de radar (observação mais

verticalizada), maiores serão os efeitos de *foreshortening* (trecho E-F) e *layover* (trecho B-A) (Figura 2.3) (CAMPBELL, 1996). Ângulos de incidência maiores minimizam esses efeitos, porém, aumentam as áreas sem informação (trecho F-G) nas quais o retroespalhamento é fraco ou nulo, implicando em falta de informação nessas regiões (PARADELLA et al., 2003).

Nas imagens de radar os deslocamentos dessas feições são maiores na projeção *slant-range*, ou distância entre o sensor e a feição no terreno, que na projeção *ground-range*, ou distância entre a projeção da plataforma no terreno e o alvo. Isso significa que quanto mais afastada da antena de radar está a região do terreno, maior será essa distorção. A Figura 2.3 apresenta imagens de radar nessas projeções, identificando o alcance próximo.

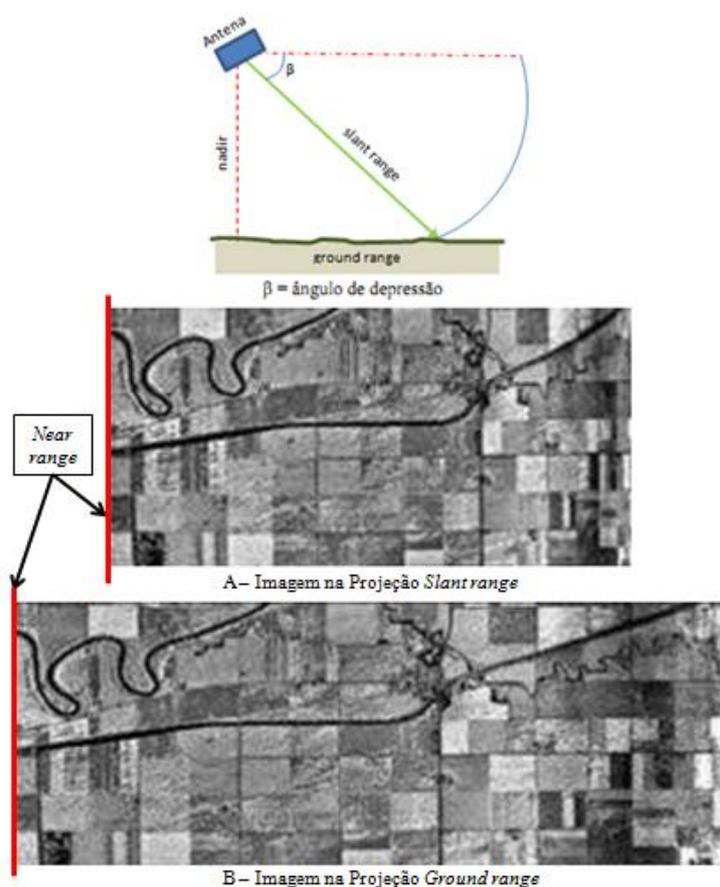


Figura 2.3 – Imagens nas projeções *Slant Range* (A) e *Ground Range* (B).

FONTE: Adaptada de CCRS (2001).

Paradella et al. (2003) relatam que nas imagens SAR as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor, bem como as linhas de projeção que conectam pontos no terreno com pontos na imagem de radar, seguem círculos concêntricos em relação à localização da antena.

## **2.2 Projeto Radiografia da Amazônia**

### **2.2.1 Aerolevantamento SAR e Apoio de Campo**

No contexto do Projeto Radiografia da Amazônia, as atividades de aerolevantamento SAR pela empresa OrbiSat, e o apoio de campo e produção cartográfica pela DSG, embora executadas por distintas instituições, podem ser resumidas nas seguintes fases: de Reconhecimento Aéreo, de Determinação de Estações de Referência, de Pré-Sinalização do Voo de Imageamento por Radar, de Aerolevantamento SAR e de Transcrição dos Dados Brutos de Radar, descritas a seguir.

Dada as dificuldades logísticas e naturais da região Amazônica, o reconhecimento aéreo tem por finalidade a escolha dos prováveis locais, sem cobertura vegetal e com acessos para instalação dos refletores de canto triédricos, que são empregados na fase de pré-sinalização.

A fase de Determinação de Estações de Referência destina-se à determinação de alta precisão, das coordenadas planialtimétricas dos pontos de apoio (estações de referência) ao voo para o imageamento. Esses pontos são selecionados previamente ao voo, materializados como bases de operações e obtidos por intermédio do transporte de coordenadas de pontos da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Simultaneamente ao voo, essas estações (segmento de terra), são ocupadas com rastreadores e visam processar, logo após o voo, os dados para obtenção da orientação e posição do feixe da antena com uma precisão da ordem de 5 cm.

A fase de Pré-Sinalização do Voo de Imageamento por Radar consiste da determinação com alta precisão das coordenadas planialtimétricas do vértice de refletores de canto triédricos. Os refletores são formados por triângulos retângulos de alumínio com lados medindo 1,41 m, 1,41 m e 2,00 m, que são instalados previamente ao voo com o

objetivo de serem empregados como pontos de controle (Figura 2.4c). O conjunto de refletores, é instalado em locais sem vegetação (Figura 2.4a) e/ou sobre plataformas aquáticas (Figura 2.4b), a intervalos de 300 a 1.200 m ao longo da direção radial de voo, e dispostos, em média, a cada 120 km ao longo da linha de voo (Figura 2.4d).

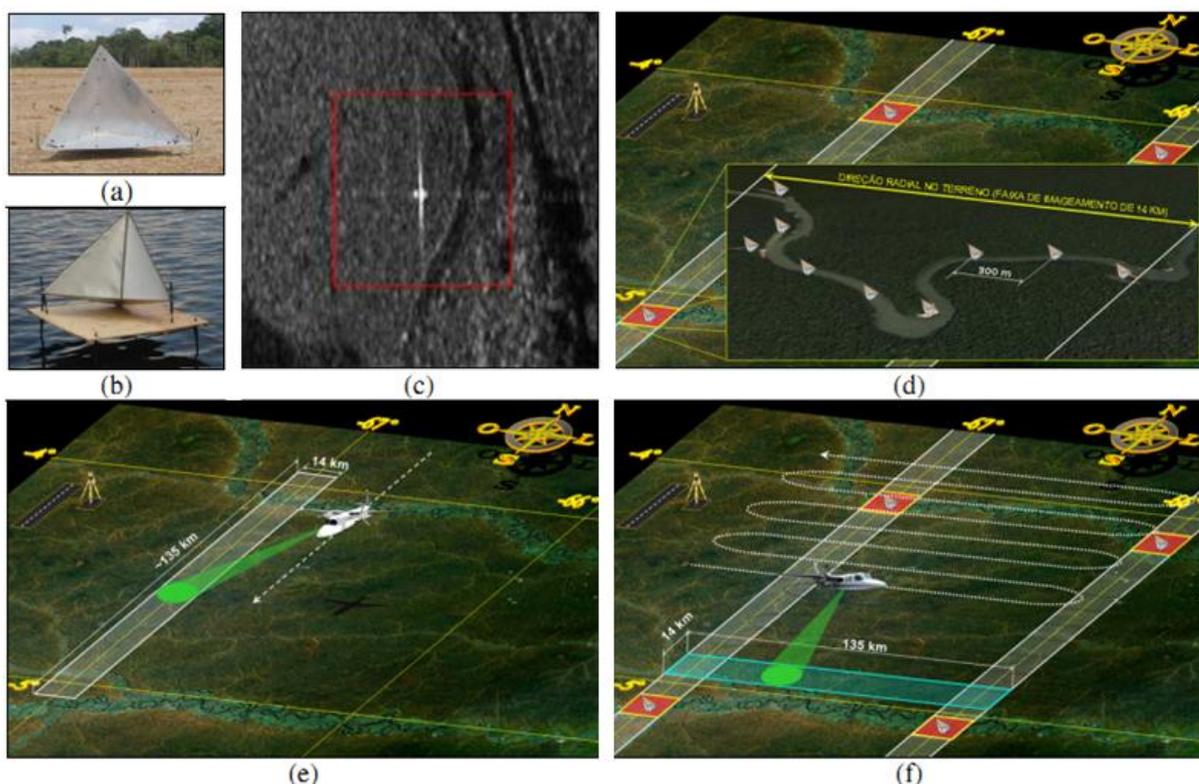


Figura 2.4 – Refletor instalado em (a) um local ideal e (b) sobre uma plataforma aquática, (c) exemplo de um sinal típico de um refletor em uma imagem SAR, e metodologia de (d) sinalização do voo de imageamento e imageamento SAR nas direções (e) norte-sul e (f) leste-oeste.

FONTE: Adaptado de Correia (2011).

A fase de Aerolevantamento SAR destina-se obter dados brutos de radar pela execução do imageamento SAR pelo sensor OrbiSAR nas bandas X e P, com comprimentos de onda de 3,1 e 7,5 cm, respectivamente. O imageamento SAR é aerotransportado, emitindo ondas eletromagnéticas pulsadas ao longo da viagem e recebendo o sinal de retorno pelas antenas. Com 1,2 m de largura, 1 m de altura, 60 cm de comprimento e

200 kg, o radar fica dentro da aeronave enquanto as antenas da banda P são posicionadas no compartimento de bagagens e as da banda X na parte externa do avião. Segundo a OrbiSat (2010) os modelos digitais gerados a partir da interferometria na banda X fornecem os Modelos Digitais de Superfícies (MDS) com alta exatidão e precisão, alcançando a precisão de 25 cm em altura e 50 cm de resolução espacial.

A área a ser voada é dividida, sempre que possível, em blocos de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Esse procedimento de voo compreende primeiramente as faixas de imageamento na direção norte-sul (Figura 2.4e) com largura de 14 km (direção radial) e com comprimento de até 220 km (direção azimutal), que engloba os refletores que foram instalados previamente ao voo (Figura 2.4d). Isso possibilita o georreferenciamento das imagens SAR das faixas voadas nos sentidos leste-oeste (Figura 2.4f), com largura radial de 14 km e com comprimento de até 180 km, que recobrem toda a área a ser mapeada.

A fase de Transcrição dos Dados Brutos de Radar visa validar a qualidade dos dados obtidos, gerar os dados de radar originais e os dados do sistema de navegação para cada linha de voo da área mapeada. É executada durante a fase de aerolevanteamento e imediatamente após a campanha diária de voo.

### **2.2.2 Metodologia de Processamento das Imagens SAR**

Cada uma das etapas descritas a seguir estão integradas em um conjunto de aplicativos, desenvolvidos pela empresa OrbiSat, no ambiente de programação IDL (ITT, 2008), com interfaces gráficas interativas com o usuário e várias funcionalidades. Dentre as funcionalidades pode-se citar o processamento em paralelo das faixas de voo; gerenciador de trabalhos na torre de processamento; gerenciador de memória e armazenamento de dados; controle da qualidade geométrica e radiométrica das imagens e modelos, etc, que possibilitam a geração dos insumos do Projeto Radiografia da Amazônia. A metodologia de Processamento das Imagens SAR com base nas imagens interferométricas nas bandas X e P é composta por quatro principais etapas: processamento dos dados brutos SAR, o processamento interferométrico, a geocodificação SAR e o mosaico (MOURA et al., 2011).

A fase de processamento dos dados brutos SAR visa converter os dados brutos de radar obtidos na fase de aerolevanteamento em imagens digitais. Isto permite gerar insumos com resolução espacial de 5m a fim de serem empregados nas fases seguintes da produção cartográfica. Num primeiro momento, a partir dos dados brutos de radar, são gerados pares de imagens do tipo *single-look complex* (SLC) monopolarizadas, na banda X (polarização HH), e multipolarizadas, na banda P (HH, HV, VH e VV). Com base nessas imagens complexas são geradas as ortoimagens SAR, as imagens de coerência interferométrica e os Modelos Digitais de Superfície (MDS) e do Terreno (MDT). O MDS e o MDT representam as variações altimétricas, respectivamente, no nível da copa das árvores (banda X) e no nível do solo (banda P), mesmo em áreas de floresta densa.

A fase de processamento interferométrico SAR tem por finalidade a geração de produtos interferométricos (fase interferométrica absoluta e imagens de coerência) a partir das imagens complexas geradas no processamento SAR. É uma técnica que mede a diferença de fase e a correlação entre as amplitudes de 2 sinais de ondas. A obtenção de tais produtos é possível graças à técnica de interferometria SAR (InSAR), *Interferometric Synthetic Aperture Radar*, que é baseada na aquisição de um par de imagens SAR *Single Look Complex* (SLC), resultantes da interação com o terreno de ecos transmitidos por uma ou duas antenas SAR, com posições geográficas conhecidas e separadas no espaço por uma distância adequada denominada por linha de base (B). A Figura 2.5 ilustra a geometria básica da interferometria SAR, onde a diferença de fase interferométrica  $\Delta\phi$  entre os sinais recebidos nas duas antenas  $S_1$  (Trajetória 1 e velocidade  $\vec{v}_{S_1}$ ) e  $S_2$  (Trajetória 2 e velocidade  $\vec{v}_{S_2}$ ), provenientes de um mesmo elemento de resolução do terreno, é diretamente proporcional a variação de distância  $\Delta r$  (MADSEN, 1993). Portanto, cada porção do terreno é imageada sob geometrias de aquisição diferentes, onde, no caso do projeto em questão, as linhas de base das bandas X e P são obtidas, respectivamente, com uma e duas passagens da aeronave, onde estão instaladas três antenas da banda X e uma da banda P.

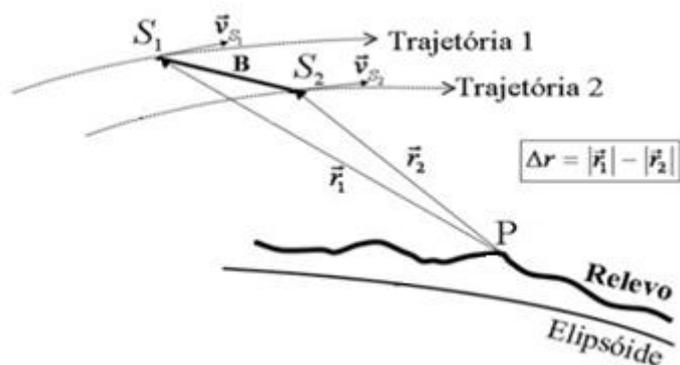


Figura 2.5 – Geometria básica InSAR.

A principal aplicação da técnica InSAR é a geração de modelos digitais de elevação (MDE), que são obtidos por meio do relacionamento entre a fase interferométrica absoluta e a topografia do terreno. O processo de cálculo da fase absoluta, denominado de processamento InSAR, está especificado no fluxograma apresentado na Figura 2.6, sendo cada uma das etapas deste fluxograma descritas a seguir.

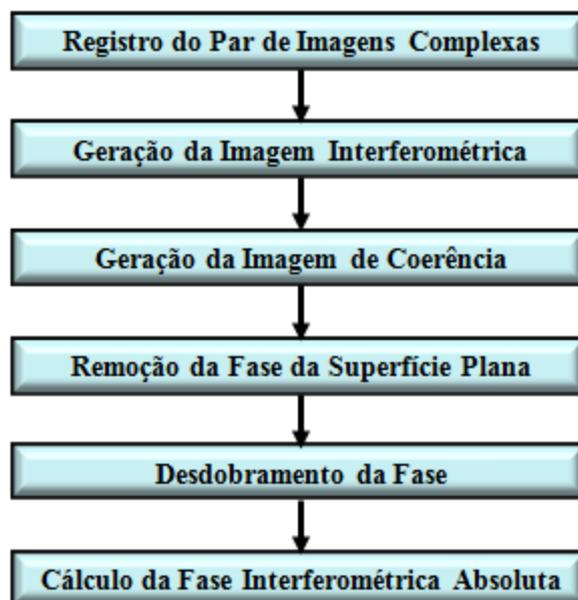


Figura 2.6 – Processamento InSAR.

O Registro do Par de Imagens Complexas consiste do registro entre o par de imagens SAR complexas. É uma das fases mais importantes do processamento InSAR, pois a

precisão obtida, que deve ser da ordem de subpixel (menor que 0,1 pixel), determinará a qualidade da fase interferométrica.

A Geração da Imagem Interferométrica é feita, após o registro do par de imagens complexas, pela multiplicação da imagem complexa pelo seu conjugado registrado. A imagem diferença de fase, chamada de interferograma, é uma função das imagens complexas, obtidas através da diferença de fase da observação de um mesmo alvo de dois pontos distintos. O interferograma apresenta padrões do tipo franjas, devido ao caráter cíclico da fase de  $2\pi$ , e um ruído próprio, que é reduzido pela técnica de filtragem espacial da média. Segundo Smith (2002), o método interferométrico atinge um grau de acurácia comparável ao obtido com a fotogrametria.

A Geração da Imagem Coerência é obtida pela estimação do módulo da correlação complexa entre as duas imagens que originaram o interferograma podendo ser considerada como uma medida de qualidade dos interferogramas gerados (CORREIA, 2011). A imagem coerência tem grande importância para o caso da interferometria de duas passagens, pois qualquer mudança na geometria ou umidade do alvo, entre as passagens, ocasiona o efeito de decorrelação temporal, não sendo possível realizar a medida de diferença de fase. Outra aplicabilidade das imagens de coerência no projeto é a utilização das mesmas em classificações de cobertura da terra (GABOARDI, 2002).

Em regiões com baixa coerência as medidas da diferença de fase não apresentam um grau de confiabilidade adequado para a geração do MDT. De acordo com Gens (1998) e Mura (2000), alguns dos fatores que podem afetar a coerência são:

- inclinação do terreno (terrenos planos causam alta coerência);
- propriedades da superfície (alvos em movimento provocam baixa coerência);
- comprimento da linha de base (quanto maior esta, menor será a coerência); e
- co-registro de baixa qualidade.

O interferograma original pode apresentar ruídos oriundos da decorrelação espacial (causado por sombras), da decorrelação temporal (intervalos longos entre as passagens), do sistema, etc. Normalmente é aplicada uma filtragem no interferograma complexo (como por exemplo, um filtro espacial de média) a fim de minimizar o efeito destes ruídos no interferograma original.

A etapa de Remoção da Fase da Superfície Plana é necessária pois o interferograma possui uma componente de fase que é devido à superfície plana. Mesmo que a altitude de um determinado ponto seja zero, como sua posição foi observada de dois pontos distintos, haverá uma diferença de fase associado ao mesmo. Trata-se da fase mencionada e esta diferença precisa ser removida, uma vez que não está associada a nenhuma informação topográfica.

A etapa do Desdobramento da Fase é necessária pois o interferograma contém a informação de fase que é diretamente relacionado com a topografia. Essa fase é dada em módulos de  $2\pi$  e, portanto, existe um problema de ambiguidade no cálculo do correto número inteiro de ciclos de fase que precisam ser determinados, visando à obtenção da correta distância na direção de visada do radar (*slant range*). Essa solução da ambiguidade é denominada de desdobramento da fase (*phase unwrapping*).

Na etapa do Cálculo da Fase Interferométrica Absoluta, os algoritmos de desdobramento de fase são baseados em métodos numéricos de integração, em que se soma uma constante ao valor da fase relativa obtida. Essa constante é denominada de *offset* da fase interferométrica e permite a obtenção da fase interferométrica absoluta, que é necessária para geração do MDE. É preciso pelo menos um ponto conhecido no terreno para recuperar a fase absoluta e calcular o valor da constante (CORREIA, 2005).

A fase de Geocodificação SAR consiste no processo de conversão da fase interferométrica absoluta em altitude do terreno, que produz imagens georreferenciadas e ortoretificadas. Para fins cartográficos, a geração da ortoimagem SAR pode ser feita sobre uma grade, por exemplo na projeção UTM, sem as distorções geométricas

inerentes de sistemas de radar de visada lateral, como o encurtamento de rampa, a inversão e a sombra, que são erros induzidos pela topografia do terreno.

O processo de geocodificação SAR é baseado nas equações de *range-Doppler* para as duas antenas SAR, onde as coordenadas de um ponto no espaço são calculadas a partir da medida da distância alvo-radar e da variação de frequência Doppler do ponto, no instante em que este é visto no centro do feixe da antena (QUARZEDDINE, 2002).

No contexto deste trabalho e do Projeto Radiografia da Amazônia, os MDE interferométricos obtidos são chamados de MDS (Modelo Digital de Superfície) e MDT (Modelo Digital do Terreno). O MDS é originado de interferogramas de passagem simples, gerados na banda X, e é uma representação matemática da distribuição espacial tridimensional das variações de altitude de uma determinada superfície que, neste caso, representa o nível da copa das árvores e de outros objetos existentes. O MDT é originado de interferogramas de dupla passagem, gerados na banda P, cuja superfície de representação acredita-se ser o nível do solo, mesmo em áreas de floresta densa. De acordo com Felgueiras e Erthal (1988), um MDT pode ser utilizado na geração de mapas de declividade, extração de perfis do terreno, determinação de intervisibilidade entre pontos, cálculos de projetos de engenharia, entre outras aplicações.

Após a geocodificação, com base nas faixas voadas na direção norte-sul (*corners tracks*), as faixas voadas na direção leste-oeste passam pelo processo de Mosaico. Nessa fase as informações das imagens da área imageada são agrupadas em blocos de  $1^\circ \times 1^\circ$ , sendo cada bloco formado por cerca de 26 faixas de voo, com superposição de setenta por cento entre as faixas, conforme é ilustrado na Figura 2.7.

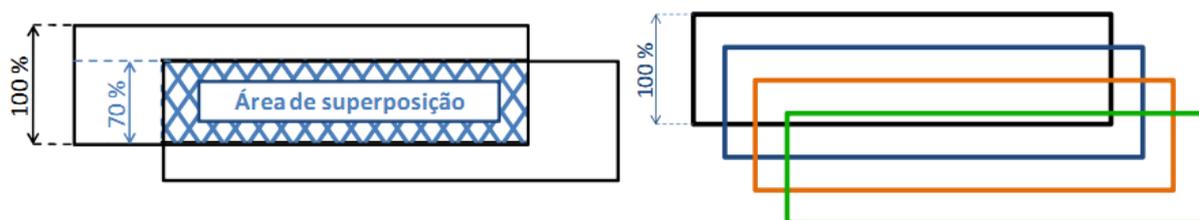


Figura 2.7 – Ilustração da superposição entre as faixas.

Entretanto, é dada maior prioridade às informações na extremidade da faixa de imageamento mais próxima ao radar (*near range*), sendo aproveitado cinquenta por cento de cada faixa para a banda X e quarenta por cento no caso da banda P, como apresentado na Figura 2.8. Ressalta-se que após essa etapa de articulação das faixas, não é possível identificar as regiões de *near range* e *far range* de cada faixa imageada, tampouco as regiões na dimensão em alcance (*slant range*).

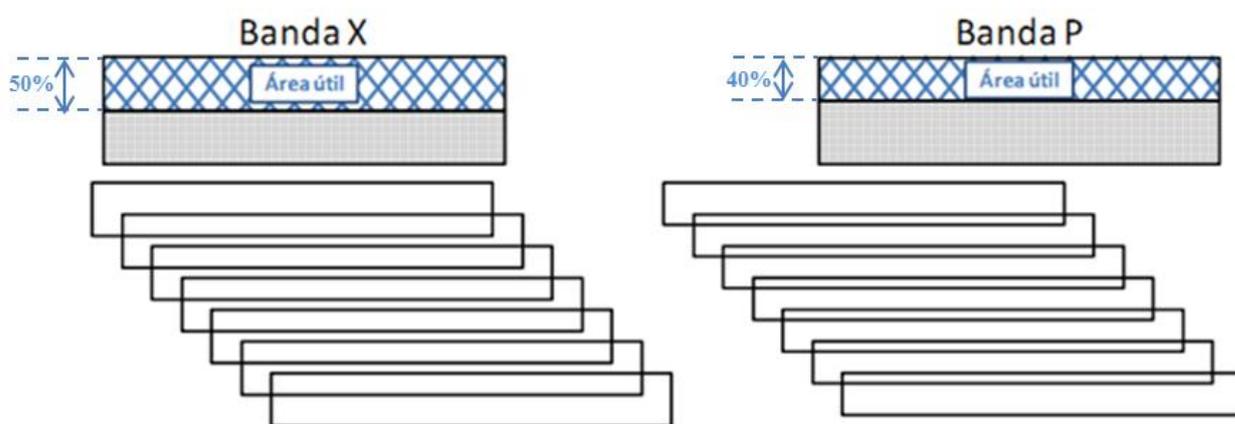


Figura 2.8 – Superposição das áreas úteis para as bandas X e P.

### 2.3 Gradiente de Declividade e Aspecto

Sendo uma importante característica do relevo, a declividade corresponde às linhas perpendiculares às curvas de nível, podendo ser decomposta em uma componente vertical, denominada gradiente de declividade e outra horizontal, denominada aspecto ou orientação de vertente. Dado um ponto P qualquer, o gradiente de declividade nesse ponto é a inclinação, em relação ao horizonte (Figura 2.10), do plano tangencial à superfície do terreno nesse ponto, sendo medida em graus ou porcentagem, podendo ser identificado em vermelho na figura. O aspecto, em verde, é a direção horizontal da declividade em relação a uma referência, sendo medido em graus no sentido horário a partir do norte (CHORLEY, 1972).

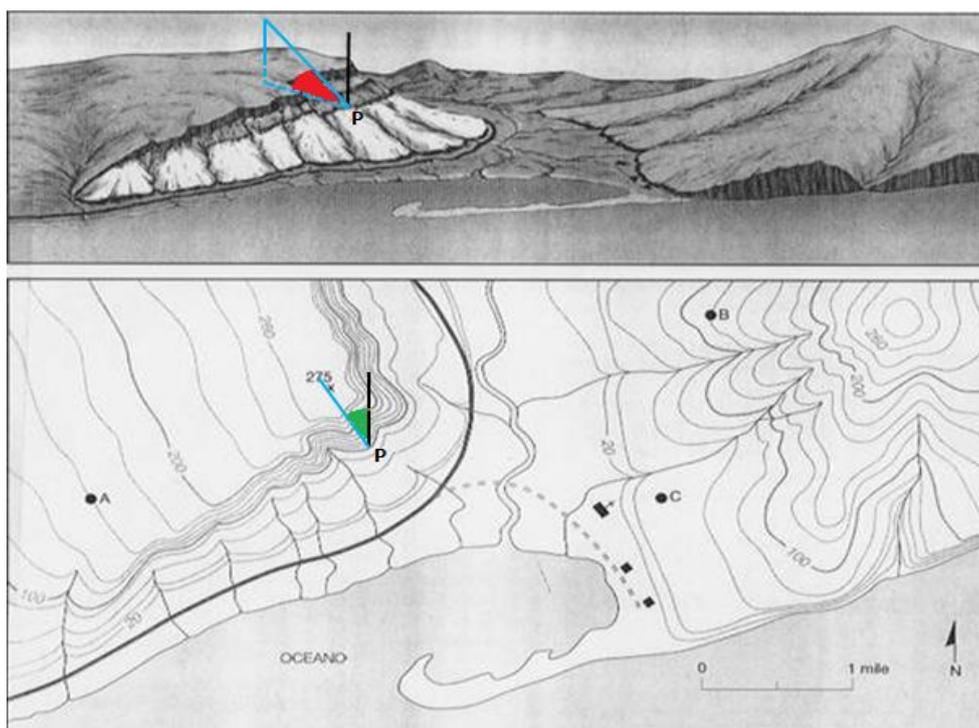


Figura 2.10 – Gradiente de declividade e aspecto.

De acordo com Bernhardsen (2002), o gradiente de declividade e o aspecto podem ser determinados a partir de um MDT. O método mais usual para o cálculo da declividade consiste em calcular a maior diferença de altitude entre a célula central e as vizinhas, dividindo o valor encontrado pela distância entre os centros destas duas células. Definida a direção da maior diferença, o aspecto pode então ser determinado pelo ângulo definido entre essa direção e a direção de referência adotada.

Sua medição em campo consiste na identificação visual da direção mais proeminente de decaimento da vertente, o que é dificultada em regiões com pouca inclinação. Nesses casos, várias medições são realizadas em distintas direções para a descoberta do maior decaimento.

## 2.4 Sistema de Posicionamento Global

A denominação oficial desse sistema é conhecida pela sigla NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite with Timing And Ranging - Global Positioning System*). É um

sistema espacial de posicionamento, baseado em radionavegação, que vem sendo desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD - *Department of Defense*) e que pode ser usado pelos usuários para determinar suas posições em coordenadas cartesianas retangulares  $[X, Y, Z]$  em relação ao centro de massa da Terra  $[0, 0, 0]$ , como mostra a Figura 2.11.

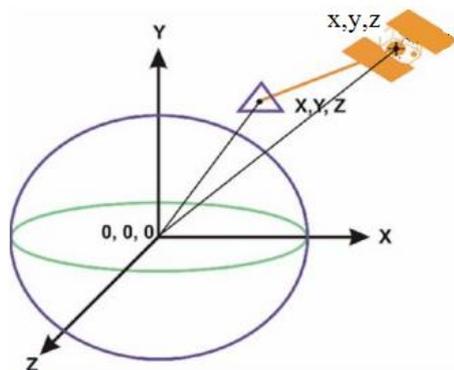


Figura 2.11 – GPS e o sistema de coordenada cartesiano.

O sistema de referência usado pelo GPS é conhecido como *World Geodetic System* (WGS 84). Além de coordenadas, o sistema fornece uma medida de tempo, cujo controle é feita por relógios atômicos em 3 escalas de tempo envolvidos no sistema: a do satélite, a do receptor e a controlada pelo segmento de monitoramento e controle, considerada como a referência ou o padrão para o qual os relógios dos satélites e dos receptores deverão ser corrigidos. Suas principais especificações são a disponibilidade contínua 24 horas/dia, a cobertura global e as informações de latitude, longitude, altitude e data/hora (MONICO, 2000).

A constelação de satélites GPS foi projetada para operar com um número mínimo de 24 satélites, divididos em 6 planos orbitais (com inclinação de  $55^\circ$  em relação ao plano do equador), permitindo uma abrangência global (USCG, 2010). Pode utilizar uma ou duas frequências localizadas na banda L, L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz), que são moduladas pelos códigos de acesso livre (C/A), preciso (P) que quando criptografado é renomeado Y e a mensagem de navegação e civil (L2C). Este garante resultados mais

robustos em ambiente com obstruções por ser emitido com maior potência (FONTANA et al., 2001)

De acordo com Sickle (1996), em relação aos métodos tradicionais de levantamento, as principais vantagens do sistema são: visada, a dispensa da intervisibilidade entre as estações, possibilidade de determinação de linhas mais longas, precisão, rapidez e automatização na coleta de coordenadas tridimensionais e transporte planialtimétrico simultâneos.

Por outro lado as principais desvantagens do sistema são o custo, necessidade da informação da ondulação geoidal, multicaminhamento, não realiza nivelamento e a obstrução do sinal causada principalmente por área urbana alta, bem como vegetação. Esse último fator é decisivo ao considerar seu emprego em áreas de floresta.

O sistema é dividido em três segmentos principais, como mostrado na Figura 2.12. O do espaço, formado pelos satélites e responsável por manter uma escala de tempo bastante precisa, receber e armazenar as informações oriundas do segmento de controle e efetuar manobras orbitais. O de controle e monitoramento tem a função de realizar o monitoramento contínuo dos satélites, calcular suas posições, transmitir os dados e executar a supervisão necessária para o controle de todos os satélites do sistema. O de usuários compreende os usuários do sistema, os tipos de receptores e os serviços de informações de apoio disponíveis.

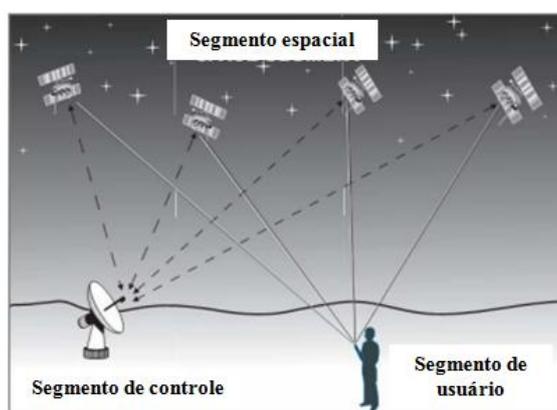


Figura 2.12 – Segmentos do Sistema de Posicionamento Global.

Há diversos fatores que afetam a precisão das observações do Sistema de Posicionamento Global. Basicamente resumem-se aos erros relacionados aos satélites, à propagação do sinal, ao receptor/antena e os relacionados à Estação.

#### **2.4.1 Técnicas de Posicionamento**

As técnicas de posicionamento visam determinar as coordenadas de pontos da superfície do terreno a partir de uma origem pré-definida, consiste em representar o local a ser levantado. As precisões desses levantamentos são definidas em função da escala do produto final, técnicas de levantamento e do modelo de equipamento utilizado.

Basicamente, três são as técnicas de posicionamento com a utilização das observáveis GPS. O posicionamento absoluto que consiste em utilizar apenas um receptor e a observação da pseudodistância. A segunda técnica é o posicionamento diferencial (*Differential GPS* - DGPS). Utilizado em tempo real durante os voo de imageamento no Projeto Radiografia da Amazônia, utiliza a pseudodistância, porém com dois receptores, um fixo denominado base e outro itinerante denominado móvel. A última técnica é o posicionamento relativo (ou interferométrico), que realiza observações da fase da onda portadora com dois receptores (BERALDO; SOARES, 1995).

Os levantamentos DGPS e relativo podem ser divididos em pós-processados ou em tempo real. O pós-processamento necessita de que as observáveis sejam armazenadas em ambos os receptores, para que depois do levantamento, os erros possam ser corrigidos. No levantamento em tempo real, existe um par de rádios-modem realizando o enlace (*link*) entre o receptor base e o móvel. As correções são processadas e enviadas do receptor base ao móvel via sinal de rádio.

O posicionamento absoluto emprega apenas um receptor, é o mais simples e é empregado em navegação ou em medições rápidas com precisão grosseira.

O posicionamento relativo possui os mais altos níveis de precisão, sendo dividido em três métodos: o estático, o cinemático e o dinâmico. O método estático, mais preciso e com precisões milimétricas, é realizado com dois receptores fixos, o primeiro

estacionado em um ponto com coordenadas conhecidas, e o segundo ocupando a posição a ser determinada. Os receptores permanecem rastreando por um tempo mínimo que permita a solução das ambiguidades. O método cinemático utiliza apenas um receptor permanentemente fixo durante a sessão de levantamento (denominado base) e estacionado sobre um ponto com coordenadas conhecidas. O outro, denominado *rover* ou móvel, permanece imóvel por um intervalo de tempo que permita a fixação da ambiguidade (inicialização). Após este intervalo, ele pode ser movimentado, levantando feições geográficas em movimento (modo contínuo) ou imóvel (modo *stop-and-go*) por alguns segundos, atingindo precisão centimétrica. O método dinâmico ou cinemático em tempo real (*Real Time Kinematic* - RTK) é similar ao cinemático, com a diferença de realizar o levantamento em tempo real.

O posicionamento DGPS utiliza pelo menos um receptor fixo localizado sobre um ponto com posição conhecida, enquanto outro receptor levanta feições pontuais (imóvel), lineares ou do tipo área (estes últimos em movimento). A grande vantagem deste método é o fato de não necessitar de um período de inicialização, como o método cinemático, para iniciar o levantamento ou ao deixar de rastrear o número mínimo de satélites. Permite também que os receptores móveis possam ser empregados a uma distância de até 500 km da base. Este tipo de posicionamento atinge precisão submétrica.

## **2.5 Avaliação da Acurácia Posicional de Produtos Cartográficos**

Controlar a acurácia posicional de um produto cartográfico, apesar de uma importante fase e muitas vezes não valorizada pelo usuário, contratante e produtor impõe a necessidade de um processo sistemático de fiscalização (GALO; CAMARGO, 1994). Esse processo, seja ele quantitativo ou qualitativo, deve se basear em documentos que estabeleçam normas esclarecedoras para a classificação dos produtos cartográficos.

Nesse contexto, existem distintos padrões para a avaliação e cada país adota algum tipo específico considerado o mais adequado às suas necessidades. O padrão brasileiro é

conhecido por Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC e o norte-americano por *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) (ZALOTI JUNIOR, 2007).

Nesses padrões, alguns termos merecem destaque. A acurácia ou exatidão se refere a proximidade entre a média das observações de uma variável aleatória e o valor esperado. A precisão mede a variabilidade das observações de uma variável aleatória. Observações agrupadas, significam possuir pouca dispersão, logo, alta precisão. Observações com alta acurácia e baixa precisão significam boa distribuição em relação ao valor esperado, mas muito dispersas. Altas acurácia e precisão são obtidas quando as observações estão muito agrupadas ao redor do valor esperado (ANDERSON; MIKHAIL, 1998).

Usualmente, a avaliação quantitativa da acurácia posicional de um produto cartográfico é uma análise comparativa e baseada na diferença (erro) entre dados observados e de referência. Isto é,  $\varepsilon_i = obs_i - ref_i$ , onde  $\varepsilon_i$ ,  $obs_i$ , e  $ref_i$ , são os valores, respectivamente, do erro e dos dados observado e de referência no  $i$ -ésimo ponto amostral. Para essa dissertação, os dados observados referem-se às leituras sobre as ortoimagens nas bandas X e P e o MDT, e os dados de referência às medições em campo dos dados obtidos pelos rastreadores GPS e Estação Total. Os erros, numa avaliação cartográfica, podem ainda ser divididos em erro planimétrico (referente às diferenças entre as coordenadas planas) e erro altimétrico (referente às diferenças entre altitudes). Desta forma, dado um ponto no terreno, cuja posição é representada pelas coordenadas planas [X, Y] e altimétrica Z, o erro em cada coordenada é dado por:

$$\varepsilon_{iC} = C_{obs_i} - C_{ref_i} \quad (2.1)$$

onde  $C$  representa a coordenada X, Y ou Z. O erro planimétrico resultante é calculado baseado nos erros das coordenadas X e Y, da seguinte forma:

$$\varepsilon_{iR} = \sqrt{\varepsilon_{iX}^2 + \varepsilon_{iY}^2} \quad (2.2)$$

onde  $R$  refere-se a resultante das coordenadas planas.

### 2.5.1 Normas Técnicas da Cartografia Brasileira

O PEC está inserido no Decreto nº 89.917 de 20 de junho de 1984, o qual estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. No PEC são definidos normas e procedimentos de padronização, permitindo a avaliação e produção de cartas com acurácia posicional compatível com padrões internacionais. De acordo com o PEC, através da estatística dos dados amostrais, é possível classificar qualquer produto cartográfico. É importante ressaltar que no PEC não se faz referência ao tamanho da amostra na avaliação de produtos cartográficos, e que o erro padrão (EP), o desvio padrão (DP) e o erro médio quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*) são consideradas medidas equivalentes (CONCAR, 1984), quando os dados estão livres de tendência.

Neste Decreto é estabelecido ainda que os padrões de exatidão planimétricos são definidos em função do Denominador da Escala da Carta (DEC), enquanto que os padrões de exatidão altimétricos são definidos em função da equidistância (eq) entre as curvas de nível. Neste decreto é apresentada uma avaliação da acurácia posicional do mapa no tocante à exatidão das informações cartográficas, criando o PEC e uma classificação das cartas em Classes A, B e C. Os Artigos 8º e 9º, do Decreto nº 89.817, que classificam uma carta quanto à exatidão e classes de cartas, respectivamente, são transcritos a seguir:

*Art. 8º As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, segundo 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.*

§2º *A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão –  $PEC = 1,6449 EP$ .*

§3º *O Erro padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.*

§4º *Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes às expressões Erro padrão, Desvio padrão e Erro médio quadrático.*

Art. 9º *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.

Nas Tabelas 2.2 e 2.3 são apresentados os valores do PEC planimétrico e altimétrico, respectivamente, de um mapa para que o mesmo seja enquadrado nas classes A, B e C. Estas tabelas resumem o exposto no Artigo 9º anteriormente citado.

Tabela 2.2 – Padrões de exatidão planimétrica.

Classe	PEC (tendência máxima)	EP <sub>PEC</sub> (erro padrão máximo)
A	0,5 mm x DEC	0,3 mm x DEC
B	0,8 mm x DEC	0,5 mm x DEC
C	1,0 mm x DEC	0,6 mm x DEC

Tabela 2.3 – Padrões de exatidão altimétrica.

Classe	PEC (tendência máxima)	EP <sub>PEC</sub> (erro padrão máximo)
A	1/2 eq	1/3 eq
B	3/5 eq	2/5 eq
C	3/4 eq	1/2 eq

Os valores máximos de tolerância planimétricas e altimétricas utilizadas como referência para a determinação do respectivo padrão do mapeamento sistemático são apresentados nas Tabelas 2.4 e 2.5, calculados a partir das Tabelas 2.2 e 2.3 respectivamente.

Tabela 2.4 – Valores máximos das escalas de mapeamento sistemático planimétrico.

Escala	Classe A (m)		Classe B (m)		Classe C (m)	
	PEC	EP <sub>PEC</sub>	PEC	EP <sub>PEC</sub>	PEC	EP <sub>PEC</sub>
1:5.000	2,5	1,5	4	2,5	5	3
1:10.000	5	3	8	5	10	6
1:25.000	12,5	7,5	20	12,5	25	15
1:50.000	25	15	40	25	50	30
1:100.000	50	30	80	50	100	60
1:250.000	125	75	200	125	250	150

Tabela 2.5 – Valores máximos das escalas de mapeamento sistemático altimétrico.

Escala	Equidistância (m)	Classe A (m)		Classe B (m)		Classe C (m)	
		PEC	EP <sub>PEC</sub>	PEC	EP <sub>PEC</sub>	PEC	EP <sub>PEC</sub>
1:5.000	2	1	0,7	1,2	0,8	1,5	1
1:10.000	5	2,5	1,7	3	2	3,8	2,5
1:25.000	10	5	3,33	6	4	7,5	5
1:50.000	20	10	6,66	12	8	15	10
1:100.000	50	25	16,66	30	20	37,5	25
1:250.000	100	50	33,33	60	40	75	50

Por exemplo, um MDT com erro padrão altimétrico de 14,628 m é compatível com um PEC classe A para a escala de 1:100.000 (equidistância de 50 m e erro padrão de 16,667 m), como apresentado por Paradella et al. (2005). Se esse MDT apresentasse o mesmo erro padrão para planimetria, seria compatível com um PEC classe A para a escala de 1:50.000 (erro padrão de 15 m). Nesse caso, o MDT teria como classificação final o seu enquadramento no PEC classe A para a escala 1:100.000.

### 2.5.2 Normas Técnicas da Cartografia Norte-Americana

O *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) é um padrão norte-americano e foi criado pelo *Federal Geographic Data Committee* em 1998 para avaliar e relatar a acurácia de dados espaciais no formato digital (MAUNE, 2007).

O NSSDA define a necessidade de coordenadas conhecidas e validadas de pelo menos 20 pontos para uma avaliação da acurácia, independente do tamanho da área avaliada. No documento é afirmado, ainda, que esta quantidade permite uma determinação razoável com um nível de confiança de 95% (NSSDA, 1999). É recomendado também que os pontos de teste devem estar bem distribuídos pela área considerada, com pelo menos 20% em cada quadrante.

A medida das acurácias horizontal e vertical é baseada no erro médio quadrático (RMSE). Segundo Holmes et al. (2000), o RMSE é medido a partir de pontos amostrados e é comumente utilizado para estimar o erro ou a incerteza nos locais em que o erro não foi medido diretamente, sendo calculado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (2.3)$$

onde, para a planimetria  $\varepsilon_i$  é a discrepância resultante ( $\varepsilon_{iR}$ ) entre as coordenadas planas dos pontos observados e de controle (referência) e para a altimetria  $\varepsilon_i$  é a diferença entre as altitudes observada e de controle ( $\varepsilon_{iz}$ ),  $n$  o número de pontos amostrais utilizados na avaliação e  $i$  o  $i$ -ésimo ponto, com  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ .

Considere, agora, uma amostra de dimensão  $n$  ( $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ ) de uma variável aleatória qualquer  $W$ . Sendo  $W$  o erro posicional, sabe-se que a variância amostral de  $W$  pode ser estimada a partir dos momentos centrais amostrais de primeira e segunda ordem, da seguinte forma:

$$s_W^2 = \overline{W^2} - \overline{W}^2 \quad (2.4)$$

onde  $s_W^2$ ,  $\overline{W}$  e  $\overline{W^2}$  são, respectivamente, a variância amostral, o primeiro e o segundo momentos centrais amostrais de  $W$ . Estes momentos são expressos por:

$$\overline{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \quad (2.5)$$

$$\overline{W^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i^2 \quad (2.6)$$

Por outro lado, sabe-se que o RMSE da variável aleatória  $W$  ( $RMSE_W$ ) é dado por:

$$RMSE_W = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i^2} \quad (2.7)$$

Então observando as equações (2.4) a (2.7) nota-se que a medida do RMSE da variável aleatória  $W$  pode ser escrita em função da média e da variância amostrais de  $W$ . Portanto, considerando que a média amostral é uma tendência dos dados analisados, o

RMSE é uma medida que leva em conta tanto a tendência quanto a precisão dos dados. Assim, pode-se afirmar que nas normas técnicas da cartografia norte-americana são avaliadas a tendência e a precisão dos dados.

Para a avaliação da acurácia horizontal, a estatística do NSSDA leva em consideração duas situações. A primeira ocorre quando os valores do RMSE nas direções N e E são considerados iguais ( $RMSE_N = RMSE_E$ ). Nesse caso,

$$RMSE_R = \sqrt{2.RMSE_N^2} = \sqrt{2.RMSE_E^2} \quad (2.8)$$

$$RMSE_R = 1,4142.RMSE_N = 1,4142.RMSE_E \quad (2.9)$$

Essas normas consideram que se os erros são normalmente distribuídos e independentes nas direções N e E, o fator 2,4477 é usado para o cálculo da acurácia horizontal a um nível de confiança de 95%. Assim,

$$Acurácia = 2,4477.RMSE_N = 2,4477.RMSE_E \quad (2.10)$$

$$Acurácia = \frac{2,4477.RMSE_R}{1,4142} \quad (2.11)$$

$$Acurácia = 1,7308RMSE_R \quad (2.12)$$

Para o segundo caso, ( $RMSE_N \neq RMSE_E$ ) a acurácia é aproximada em

$$Acurácia \sim (2,4477)(0,5)(RMSE_N + RMSE_E) \quad (2.13)$$

Para a avaliação da acurácia vertical, a estatística do NSSDA consiste em multiplicar o RMSE por 1,96 para a acurácia vertical absoluta, a fim de se atingir um nível de confiança de 95%, desde que os erros sejam normalmente distribuídos. Ao final da avaliação, é redigida uma afirmação sobre a acurácia do produto, como por exemplo:

Acurácia do posicionamento vertical: usando o *National Standard for Spatial Data Accuracy*, o conjunto de dados testado apresentou 5 m de acurácia vertical a 95% de nível de confiança.

É possível ainda, como é mostrado na Tabela 2.6, relacionar planimetricamente essa acurácia com a prevista pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) (*ASPRS Specifications and Standards Committee*, 1990).

Tabela 2.6 – Relação entre NSSDA e ASPRS.

Acurácia RMSE (m)	Escala
0,0125	1:50
0,025	1:100
0,050	1:200
0,125	1:500
0,25	1:1.000
0,50	1:2.000
1,00	1:4.000
1,25	1:5.000
2,50	1:10.000
5,00	1:20.000

Da Tabela 2.6, pode relacionar a Denominador da Escala da Carta (*DEC*) a partir da Acurácia *RMSE* (m) pela equação:

$$DEC = 4000.RMSE \quad (2.14)$$

### 2.5.3 Análise de Tendência e Precisão

Segundo Galo e Camargo (1994), as análises de tendência e exatidão de uma carta são baseadas nas análises estatísticas das discrepâncias (erros) entre as coordenadas observadas na carta e as coordenadas de referência. Estes erros são calculados para cada ponto medido em campo e são tratados como variáveis aleatórias. Portanto, avaliações estatísticas a respeito dos erros podem ser realizadas. As primeiras estatísticas a serem calculadas são a média e o desvio padrão dos erros amostrais, dados por:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (2.15)$$

$$s_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2 \quad (2.16)$$

A média amostral é utilizada na análise de tendência dos dados, enquanto o desvio padrão amostral na análise de precisão dos mesmos. No teste de tendência (teste  $t$ ), o objetivo é comparar as médias, de forma pareada, duas distribuições normais. Na hipótese nula se supõe que a diferença das médias é zero, ou seja, considera-se não haver diferença entre os grupos.

$$\begin{cases} H_0 : \bar{\varepsilon} = 0 \\ H_1 : \bar{\varepsilon} \neq 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Para este teste calcula-se a estatística amostral  $t$ , e verifica-se se o valor encontra-se no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O valor de  $t$  amostral é expresso por:

$$t_{\varepsilon} = \frac{\bar{\varepsilon}}{s_{\varepsilon}} \sqrt{n} \quad (2.18)$$

e o intervalo de confiança por:

$$|t_{\varepsilon}| < t_{(n-1; \alpha/2)} \quad (2.19)$$

onde  $(n-1)$  são os graus de liberdade e  $\alpha$  o nível de significância do teste.

Segundo Galo e Camargo (1994), se a estatística amostral  $t$  estiver fora do intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a carta não pode ser considerada como livre de tendências significativas nas coordenadas testadas, para um determinado nível de confiança.

Para verificar a precisão, a análise é realizada comparando-se o desvio padrão dos erros com o desvio padrão esperado das classes desejadas (classes A, B ou C definidas no

PEC, na seção 2.7.1). Neste caso o teste do Qui-Quadrado é aplicado, formulando-se as seguintes hipótese:

$$\begin{cases} H_0 : s_\varepsilon^2 \leq \sigma_\varepsilon^2 \\ H_1 : s_\varepsilon^2 > \sigma_\varepsilon^2 \end{cases} \quad (2.20)$$

onde  $\sigma_\varepsilon$  é o desvio padrão esperado para a classe de interesse. Calculado o desvio padrão esperado, realiza-se a estatística através da expressão:

$$\chi_\varepsilon^2 = (n-1) \frac{s_\varepsilon^2}{\sigma_\varepsilon^2} \quad (2.21)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, como segue:

$$\chi_\varepsilon^2 \leq \chi_{(n-1; \alpha)}^2 \quad (2.22)$$

onde  $(n-1)$  são os graus de liberdade e  $\alpha$  o nível de significância do teste. Caso a equação (2.22) não seja verificada, não há evidência para se aceitar a hipótese  $H_0$ , ou seja, afirmar que a carta atenda à precisão pré-estabelecida (ITAME, 2001).

A partir dessa análise de precisão é possível enquadrar o produto cartográfico em avaliação dentro das normas técnicas da cartografia brasileira (PEC), desde que não haja tendências ou as mesmas tenham sido removidas. No caso da avaliação planimétrica pode-se calcular o mínimo valor da escala da carta (DEC) e no caso da avaliação altimétrica pode-se calcular o mínimo valor de equidistância (eq) para os quais o produto cartográfico seria classificado nas classes do PEC.

Na avaliação planimétrica, nota-se da Tabela 2.2 que o erro padrão da resultante (EP) está diretamente relacionado ao DEC, ou seja,  $EP = k_p \cdot DEC$ , com  $k_p = 0,3$  mm, 0,5 mm ou 0,6 mm para as classes A, B ou C, respectivamente. Admitindo ainda que os erros são iguais nas duas coordenadas planas ( $\varepsilon_{iX} = \varepsilon_{iY}$ ), isto acarretaria em o erro padrão da

resultante ser igual ao desvio padrão esperado para a classe de interesse multiplicado por um fator de  $\sqrt{2}$  ( $EP = \sqrt{2}\sigma_\varepsilon$ ). Portanto, o DEC pode ser calculado por:

$$DEC = \frac{\sigma_\varepsilon \sqrt{2}}{k_p}. \quad (2.23)$$

Agora substituindo as equações (2.21) e (2.22) na inequação (2.23), encontrar-se-á o mínimo valor do DEC para o qual a hipótese nula é aceita:

$$DEC_{\min} = \frac{\sqrt{2}}{k_p} \sqrt{(n-1) \frac{s_\varepsilon^2}{\chi_{(n-1;\alpha)}^2}} \quad (2.24)$$

Na avaliação altimétrica, utilizando a Tabela 2.3, com procedimento de cálculo similar ao realizado para o caso da avaliação planimétrica, encontrar-se-á o mínimo valor da equidistância para o qual a hipótese nula é aceita

$$eq_{\min} = \frac{1}{k_a} \sqrt{(n-1) \frac{s_\varepsilon^2}{\chi_{(n-1;\alpha)}^2}} \quad (2.25)$$

onde  $k_a = 1/3, 2/5$  ou  $1/2$  para as classes A, B ou C, respectivamente.

Como,

$$EP = eq.k_\alpha \quad (2.26)$$

e,

$$PEC = 1,5.EP \quad (2.27)$$

tem-se para o mínimo valor do Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrico:

$$PEC_{\min} = 1,5 \cdot \sqrt{(n-1) \frac{s_\varepsilon^2}{\chi_{(n-1;\alpha)}^2}} \quad (2.28)$$

## **2.6 Características das feições que podem influenciar a acurácia posicional de um MDT Interferométrico**

Alguns fatores associados às feições que podem influenciar a acurácia posicional de um MDT interferométrico são a declividade do terreno (gradiente de declividade e aspecto), uso e cobertura do solo e o movimento do alvo durante o imageamento. Alguns trabalhos de pesquisa, semelhante ao desenvolvido nessa dissertação, avaliaram esses fatores mensurando suas influências.

Madsen et al. (1995) avaliaram MDTs obtidos a partir de dados do SAR aerotransportado NASA DC-8 na banda C, considerando dois tipos de terrenos: plano e montanhoso. Foram detectados erros médios quadráticos de 2,2 m e 5,0 m para áreas planas e montanhosas, respectivamente. Segundo os pesquisadores, a influência da vegetação foi considerada desprezível em relação às medições de altitudes, por serem compostas por arbustos de aproximadamente meio metro de altura.

Diferentes acurácias obtidas para vários tipos de cobertura e uso do solo com dados do ERS-1 (banda C) foram identificadas por Wu et al. (1996). Distintas coberturas de solo possuem propriedades e reflectividade também distintas, o que resulta em diferentes valores de coerência. Valores crescentes de coerência e acurácia foram encontrados, respectivamente, para floresta, área urbana, área rural e *corner reflector*. Nos trabalhos de Small e Nuesch (1996) e de Gelautz et al. (2003), utilizando dados na banda C, também foram identificados valores baixos de coerência para florestas, principalmente aquelas localizadas em regiões montanhosas.

Hodgson et al. (2003) realizaram uma comparação dos MDTs extraídos de dados obtidos de um SAR na banda X e de um LIDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportados. Em uma área com gradiente de declividade variando de 0 a 14%, foram analisados os relacionamentos entre os erros de elevação com os gradientes de declividade e com a cobertura do solo (grama baixa e alta, pinheiro, vegetação decídua e arbustiva). Os resultados obtidos para o SAR, indicam uma forte relação entre a acurácia da elevação e o tipo de cobertura de solo e, em menor grau, relacionada a declividade.

Ludwig e Schneider (2006) avaliaram o MDT extraído do SRTM na banda X, sendo empregados pontos de controle, perfilagem e subtração de imagens na avaliação. O MDT do SRTM foi analisado quanto ao aspecto, declividade, ângulo de incidência local e uso do solo (áreas urbanas, agricultura, floresta, vegetação arbustiva, áreas abertas, brejos e corpos d'água). O estudo concluiu que o MDT do SRTM superestima a altitude em relevos movimentados e subestima em relevos planos; que o erro aumenta com a declividade; e também que a classe aspecto apresenta erros menores em sudeste e maiores em noroeste. No entanto, não foi encontrada uma relação significativa entre uso do solo e a acurácia do MDT do SRTM, apesar de não terem sido realizados testes estatísticos que validassem esta afirmação.

Toutin (2002) também realizou uma análise do impacto da declividade e do aspecto na acurácia de MDTs radargramétricos, utilizando dados provenientes do sensor a bordo do Radarsat-1 (banda C). A partir de MDTs de referência, foram extraídos os modelos de declividade e de aspecto. Os estratos de aspecto utilizados foram: *foreslope* (compreendendo a região mais iluminada pelo radar), *backslope* (a região não iluminada pelo radar), azimute (a região no sentido de deslocamento do satélite) e azimute reverso (a região oposta à região azimute). A acurácia do MDT teve alta correlação com o gradiente de declividade. Para o aspecto, o melhor e o pior resultados ocorreram para o *foreslope* e *backslope*, respectivamente.

Moura (2005) desenvolveu um procedimento de calibração de modelos altimétricos a partir de vários modelos de correção cobrindo áreas parciais da área a ser calibrada. Analisou as incertezas associadas à metodologia de aquisição e interpolação dos dados e avaliou o posicionamento relativo entre o MDS e o MDT associados às bandas X e P, respectivamente, concluindo haver pequenas inversões e afastamentos entre os modelos.

Zaloti Junior (2007) avaliando o MDT extraído de dados do SRTM com base na declividade, aspecto e uso/cobertura do solo, identificou o comportamento do MDT do SRTM em diversos estratos. Este estudo mostrou que, à exceção das classes de uso/cobertura do solo, o comportamento do MDT nos estratos foi significativamente diferente com um nível de significância de 5%. Isso permite afirmar que o modelo

interferométrico foi influenciado pela declividade e pelo aspecto. Concluiu também que o MDT do SRTM superestima a altitude em todos os estratos.

Elmiro (2008) avaliou e desenvolveu metodologia para corrigir Modelos Digitais de Elevação InSAR nas bandas X e P levantados por varredura a laser (LIDAR) para aplicações em ambientes de florestas tropicais. Analisando tanto erros globais como locais, verificou a melhora da qualidade interna dos modelos, aproximando-os da verdade geográfica do terreno em exatidão e precisão. Revelou ainda que os dados altimétricos necessitavam de avaliações e correções antes de poderem ser utilizados em outras aplicações.

Chagas et al. (2010) avaliaram três modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. Estes modelos foram obtidos de cartas topográficas na escala 1:50.000 (MDE CARTA) e a partir de sensores remotos, o MDE do SRTM e o MDE do ASTER. Concluiu que a análise quantitativa pelo RMSE mostrou que o MDE CARTA é superior aos demais e que os resultados obtidos pelo MDE ASTER não foram satisfatórios, apresentando valores de RMSE significativamente mais elevados que os obtidos em outros estudos. Observou ainda que o MDE SRTM apresentou resultado quantitativo semelhante ao MDE CARTA e significativamente melhor do que o MDE ASTER, e que o MDE CARTA apresentou, no geral, os melhores resultados e o mesmo pode ser utilizado para derivar atributos topográficos primários e secundários empregados no mapeamento digital de solos.

## CAPÍTULO 3

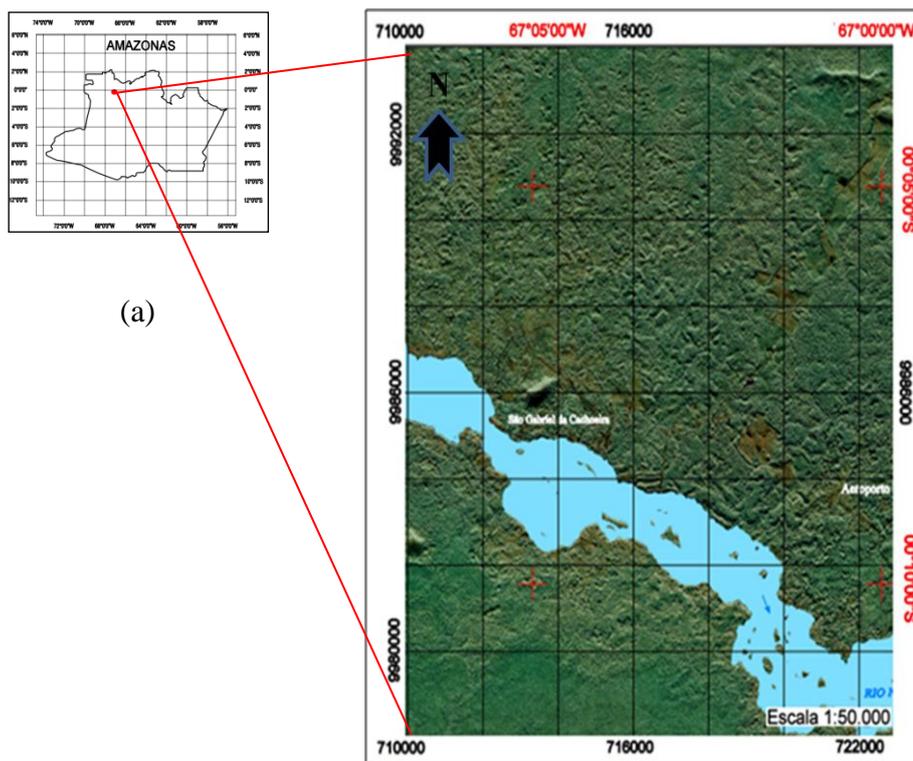
### MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentadas as características da área de estudo, os materiais utilizados e as abordagens metodológicas adotadas na avaliação planialtimétrica dos produtos cartográficos gerados a partir do imageamento SAR.

#### 3.1 Descrição da Área de Estudo

A escolha do município de São Gabriel da Cachoeira/AM como área de estudo deu-se por diversos motivos, entre os quais destacam-se a desatualizada e a escassa existência de produtos cartográficos, bem como todos os meios estarem alocados nessa região para a execução do Projeto Radiografia da Amazônia. Soma-se ainda o fato de existirem 6 Organizações Militares (OMs) do Exército Brasileiro (EB) para o apoio logístico, haver a coincidência do período de seca e a possibilidade deste município vir a se constituir em uma nova área de testes para futuros experimentos, pela variedade de cenários com distintas coberturas vegetais, rios, igarapés, cachoeiras, florestas, morros e serras.

O município de São Gabriel da Cachoeira, mostrado na Figura 3.1a, localiza-se no extremo noroeste do Amazonas, na bacia do Alto Rio Negro, no interior da maior floresta tropical do planeta. A área de estudo é ilustrada na Figura 3.1b através de uma carta imagem confeccionada pela OrbiSat a partir dos dados SAR na banda X e polarização HH.



(a) (b)  
 Figura 3.1 – Área de estudo: (a) localização do município e (b) carta imagem gerada na banda X (polarização HH).

Trata-se de um município que dista 852 km em linha reta de Manaus. É um dos sessenta e dois municípios do Amazonas e é considerado o terceiro maior município do país em extensão territorial, com 112.255 km<sup>2</sup> correspondentes a 7,18% da área total do Estado. Este município é maior que o Estado de Santa Catarina (95.346,18 km<sup>2</sup>). Mais de 80% são terras indígenas demarcadas e regularizadas e está situado a 90 m acima do nível do mar, à margem esquerda do Rio Negro, um dos três maiores rios do mundo. Tem por estações o período de chuvas (inverno), com duração de janeiro a junho, e o período de seca (verão), de julho a dezembro. Possui relativa diversidade de relevo, vastas e distintas áreas de cobertura vegetal, presença de uma área urbana, clima equatorial diretamente influenciado pela presença da maior rede hidrográfica e da mais densa e exuberante cobertura vegetal do planeta. Apresenta ainda umidade relativa do ar elevada com médias acima de 80%, elevado índice pluviométrico, chegando a ultrapassar muitas vezes os 3.000 mm anuais, com verões secos e invernos chuvosos, temperaturas médias

superiores a 25°C, baixa latitude, relevo de planície e baixos planaltos, que não oferecem obstáculo à livre circulação de ar na região.

### **3.2 Materiais Empregados**

Os dados utilizados na investigação foram obtidos de 12 faixas do aerolevante realizado pela empresa OrbiSat no período de 30 de novembro a 09 de dezembro de 2008 com o sensor OrbiSAR. Os produtos cartográficos considerados são:

- MDT interferométrico da banda P;
- Ortoimagem em amplitude da banda X, polarização HH e resolução espacial de 5 m;
- Ortoimagens em amplitude da banda P, polarizações HH, HV, VH e VV e resolução espacial 5 m;

Os modelos digitais de elevação (MDS e MDT) são mostrados na Figura 3.2, onde as altitudes são representadas em cores, variando da cor azul marinho (baixas altitudes) até a cor vermelha (altas altitudes). Regiões na cor branca correspondem a locais sem informação de altitude. Dessas áreas pode-se observar no MDT a existência de regiões fora do rio que não aparecem no MDS. Nestas regiões as altitudes não foram estimadas no MDT devido a problemas no cálculo da coerência usando os dados da banda P. Na Figura 3.3 podem ser vistas as ortimagens nas bandas X e P, ilustrando os distintos retroespalhamentos dos alvos presentes na cena imageada. Retroespalhamento estes que têm diferentes características nas bandas X e P e também nas diversas polarizações.

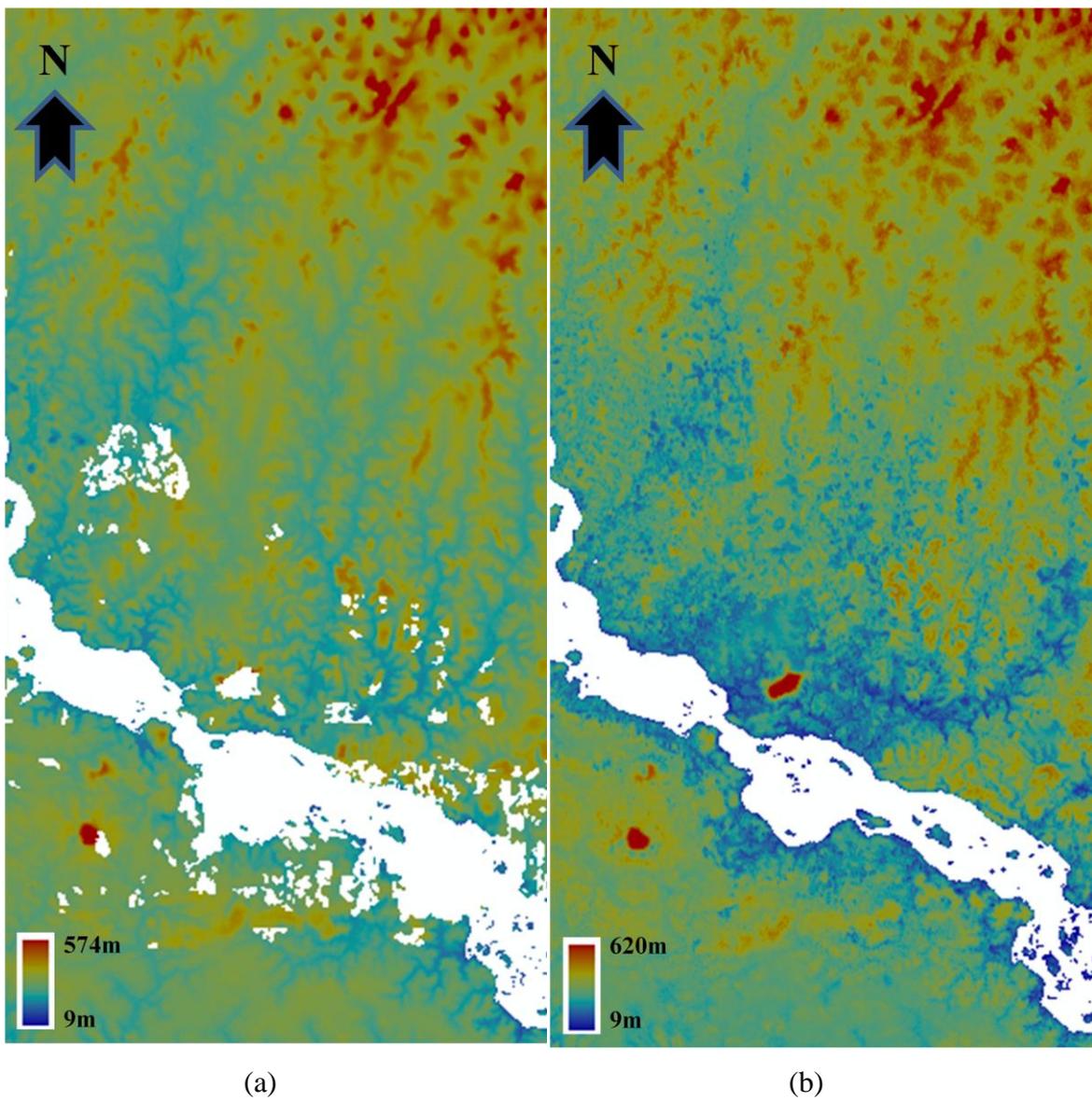
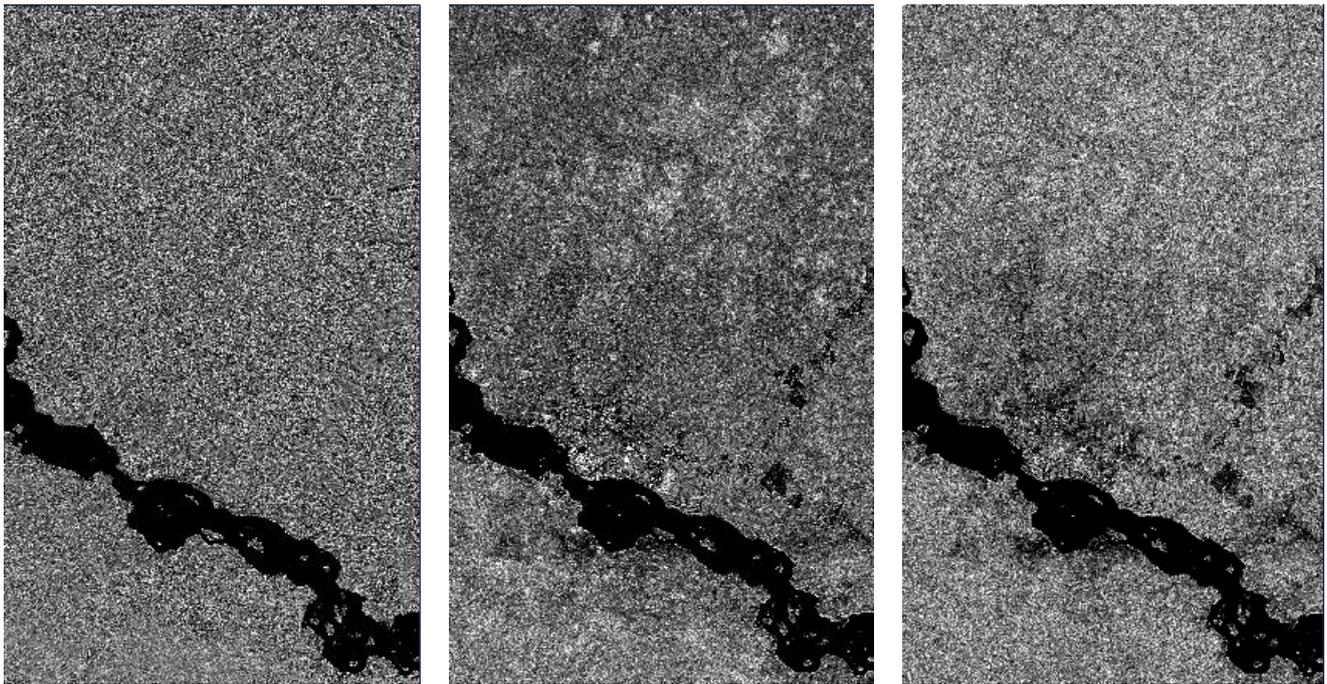


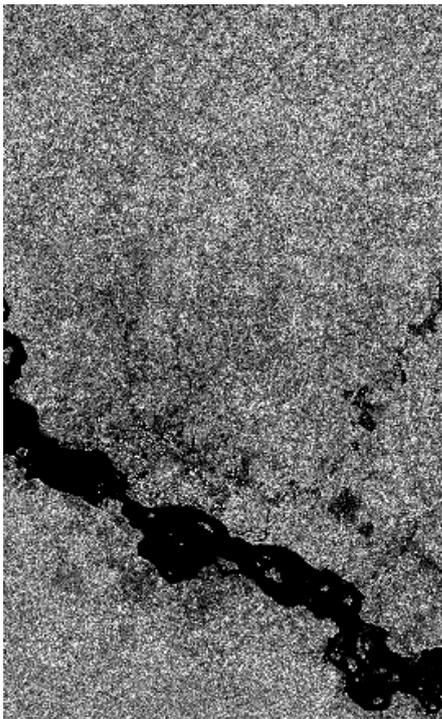
Figura 3.2 – Modelo digital: (a) do terreno (MDT) e (b) de superfície (MDS).



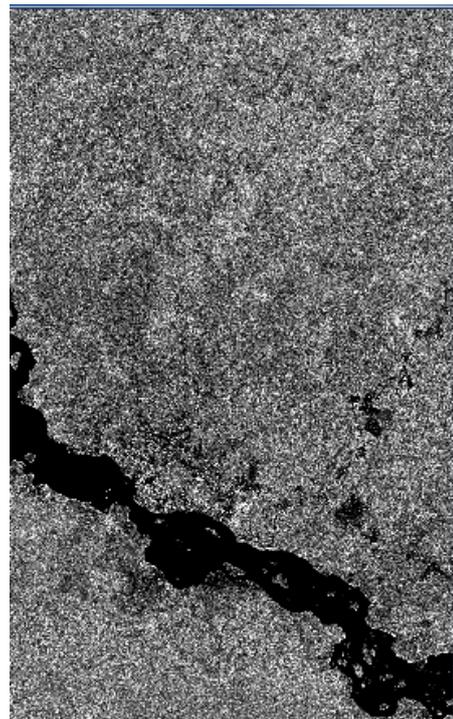
(a)

(b)

(c)



(d)



(e)

Figura 3.3 – Ortoimagens: (a) banda X (HH), (b) banda P (HH), (c) banda P (HV), (d) banda P (VH) e (e) banda P (VV).

Outros dados usados:

- Imagem TM, LANDSAT 5, 002/60, passagem 13 de fevereiro de 2010 (INPE);
- Imagem TM, LANDSAT 5, 003/60, passagem 11 de julho de 2009 (INPE);
- Imagem CCD, CBERS-2B, 181/100, passagem 28 de agosto de 2008 (INPE);
- Imagem LISS-3, ResourceSAT, 307/075, passagem 20 de janeiro de 2010 (INPE);
- 1971 pontos levantados com rastreadores GPS e Estação Total, com precisão horizontal estimada de 1 cm e vertical de 1,5 cm;
- Dados com polígonos de desflorestamento entre 2005 e 2010 do PRODES (Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia);
- Dados do censo de 2010 do IBGE.

Os seguintes *softwares* e equipamentos foram utilizados para a coleta e análise dos dados:

- Programa de geoprocessamento (Sistema de Informação Geográfica – SIG) ArcGis versão 9.1;
- Programa de processamento ENVI (*Environmente for Visualizing Images*) versão 4.5;
- *Software* de Processamento Digital de Imagens PCI Geomatica Versão 9.0 (PCI Geomatics Enterprises Inc.®)
- *Software* Marlin, versão 3.1.1, versão da Terralib “3.3.1”, Copyright (C) 2009 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
- *GPS ConFigurator Software*;
- *WinFlash Software*;
- *Software Trimble Survey Controller*;
- Programa de processamento de dados *Trimble Digital Fieldbook Software version 5.00 Ephemeris Data*;
- Coletores de dados *Recon Mobile 6.0*;
- *Software GPS Pathfinder Office*;

- Extensão *Trimble GPS Analyst™* para o *software* ESRI ArcGIS;
- 01 estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - SAGA;
- 02 (dois) pares de receptores de dupla frequência Trimble® 5700 GPS Receiver;
- 04 (quatro) GPS de navegação Garmin, modelo eTrex®;
- 02 (duas) Estações Total Eletrônica TOPCON série CTS-3000;
- Programa de processamento de dados TOPCON;
- Equipamento topográficos para a realização de trabalhos de levantamento.

### 3.3 Método

As etapas de trabalho são apresentadas no esquema da Figura 3.4, sendo cada componente do fluxograma detalhado no decorrer deste Capítulo.

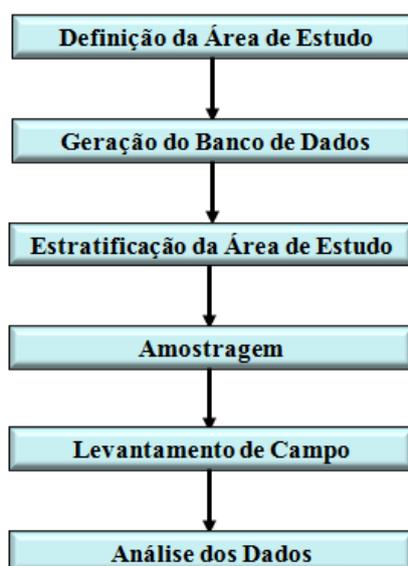


Figura 3.4 – Fluxograma das etapas de trabalho.

#### 3.3.1 Geração do Banco de Dados

O armazenamento, processamento e gerenciamento dos dados foram realizados com o programa ArcGis em planos de informação. Para sua organização e geração do Banco de Dados, foi adotado um sistema de referência único, o sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), Zona 19S e o datum WGS-84.

Nessa etapa foi possível realizar a análise visual das ortoimagens e dos modelos digitais de elevação, dimensionar possíveis distorções nos dados e elaborar todas as ferramentas para a análises topológicas dos pontos, linhas e áreas: intersecções, separação de polígonos, cálculo de áreas, aplicação de *buffer*, união de polígonos, geração de malhas regulares, confecção de *layouts*.

### **3.3.2 Estratificação da Área de Estudo**

Inicialmente a área de estudo foi dividida em estratos, isto é, regiões com características físicas homogêneas. Estas características foram divididas levando-se em conta fatores que poderiam influenciar na acurácia do MDT extraído da interferometria SAR, quer em classes isoladas, quer na intersecção dessas, conforme mostrado em alguns trabalhos descritos na Seção 2.6. Os estratos considerados neste trabalho foram constituídos pelas classes de uso e cobertura do solo e gradiente de declividade. Foi considerado como principal requisito para as análises e determinações da relevância dos estratos, suas áreas, quer isoladas ou conjuntas. Vale relembrar que as classes do aspecto e dimensão em alcance não foram consideradas em razão da impossibilidade de suas localizações, como mostrado na Seção 2.2.2.

#### **3.3.2.1 Classes de Uso e Cobertura do Solo**

As classes de uso e cobertura do solo adotadas neste trabalho foram definidas com base no prévio estudo do resultado do censo de 2010 do (IBGE, 2010) para lavouras temporárias, permanentes, produção pecuária e área urbana. Dessa análise foram determinadas as seguintes classes: área urbana, solo exposto, pastagem, regeneração, floresta primária e corpos d'água. Entretanto, devido a presença de nuvens e sombras nas imagens ópticas utilizadas, estas classes também foram definidas.

Para a obtenção das classes de uso/cobertura do solo foram utilizadas inicialmente as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 das imagens do sensor TM/LANDSAT-5, de 11 de julho de 2009 e 13 de fevereiro de 2010, com resolução espacial de 30 m e as bandas 1, 2, 3, 4 e 5 de uma imagem do sensor CCD/CBERS-2B, de 28 de agosto de 2008, com resolução espacial de 20 m. O objetivo inicial foi ortorretificar essas imagens com o módulo *Orthoengine* do

*Geomatica* para corrigir distorções devido ao deslocamento do relevo, o que não foi possível devido à carência de referências planimétricas. A solução encontrada foi utilizar as bandas 2, 3, 4 e 5 do sensor LISS-3, de 20 de janeiro de 2010, com resolução espacial de 23,5 m. Foram selecionados 26 pontos de controle distribuídos na imagem que possibilitaram seu registro com um erro médio quadrático final de 30 m (1,28 pixel). A imagem registrada foi então recortada de modo a corresponder à área de estudo.

A seguir, foi empregado o classificador *Support Vectors Machine* (SVM) implementado no ENVI, para a extração das classes de interesse a partir da imagem óptica registrada. Foram feitas 40 classificações com a variação do parâmetro de Penalidade (25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200). Esse parâmetro permite ao usuário controlar o antagonismo entre o rigor/permisividade do hiperplano e a aceitação/rejeição de erros de treinamento contidos nas amostras. Para as classes de interesse foram coletadas amostras de treinamento em quantidade superior a 150 *pixels* em áreas previamente selecionadas através de análise visual interpretativa e de série temporal até 2010 das taxas de desflorestamento do programa PRODES. Posteriormente, foi solicitado a militares na região que reconhecessem essas áreas documentando-as com registro escrito e fotográfico. As classes obtidas ao final dessa etapa, num total de 8, foram: *Área Urbana* (Au), *Floresta* (Fl), *Regeneração* (Re), *Pastagem* (Pa), *Solo Exposto* (Se), *Sombra* (So), *Nuvem* (Nu) e *Água* (Ag). Dessas somente as 5 primeiras foram consideradas.

### 3.3.2.2 Classes de Declividade

A definição das classes de gradiente de declividade foi baseada na categorização proposta por De Biase (1993). Estas classes estão mostradas na Tabela 3.1, as quais posteriormente foram reduzidas a três, como resumido na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Classes de gradiente de declividade proposta por De Biase (1993).

Declividade (%)	Relevo
0-3	Várzea
3-6	Plano e Suavemente ondulado
6-12	Suavemente ondulado a ondulado
12-20	Ondulado a fortemente ondulado
20-40	Fortemente ondulado a montanhoso
>40	Montanhoso

Tabela 3.2 – Classes de gradiente de declividade empregadas.

Declividade (%)	Relevo
0-6	Plano
6-20	Ondulado
>20	Montanhoso

Como não havia documento cartográfico validado pré-existente na região de estudo que pudesse servir de referência para a divisão da área de estudo nessas classes de gradiente, foi necessário trabalhar com o próprio MDT a ser avaliado. Outros modelos digitais de elevação disponíveis, como por exemplo o do SRTM, devido à sua resolução espacial de 90 m foi descartado para esse trabalho. Este fato imperou na obrigatoriedade de confirmar o gradiente de declividade para cada ponto durante a realização do levantamento de campo.

O MDT e o MDS foram revisados para a verificação, por exemplo, da existência de regiões correspondentes a terras emersas com ausência de informações altimétricas. Esse fenômeno levou à consideração de uma quarta classe de gradiente de declividade, o de *Sem informação de declividade* (Sd). Ao final dessa etapa, foi obtido um mapa de gradiente de declividade com as quatro classes definidas.

### 3.3.2.3 Cruzamento das categorias

A análise do MDT gerado pelo sensor OrbiSAR foi realizada por estratos, com a finalidade de determinar possíveis fatores que podem influenciar sua acurácia. Os estratos propostos para este trabalho foram obtidos a partir da determinação das regiões com características físicas homogêneas, sendo obtidos pelo cruzamento dos diferentes fatores que podem afetar a acurácia posicional do MDT. O mapa de cruzamentos foi obtido por intermédio da aplicação de uma operação de interseção espacial sobre os planos de informação que continham as classes de gradiente de declividade e de uso/cobertura do solo. As combinações consideradas totalizaram 20 tipos de estratos. Esse procedimento resultou em diversas áreas para cada tipo de estrato. Cada uma delas foi associada a um tipo de estrato e relacionada a um número único de 3 dígitos identificador para o estrato considerado.

Visando reduzir o grau de incerteza que há nas regiões de interface de estratos com características distintas, o passo seguinte consistiu em determinar um *buffer* nos limites formados pelo cruzamento dos estratos. Foram analisados para a área de estudo os valores de 10, 20, 30, 40 e 50 m, e analisados individualmente levando em consideração as áreas remanescentes, excluídas as incorporadas pelo *buffer*. Dessa análise, definiu-se 10 m como o valor a ser aplicado.

Foi utilizada uma nomenclatura para identificar os pontos a serem medidos em campo e que servirão de referência. Definiu-se um nome composto para identificar a finalidade de cada ponto. Essa nomenclatura é formada por uma primeira letra (P ou A) se o ponto foi destinado a avaliar planimetria ou altimetria. Seguem outras letras que definirão o gradiente de declividade: Sd (*Sem informação de declividade*), Pl (*Plano*), On (*Ondulado*) ou Mo (*Montanhoso*), e o tipo de uso e cobertura do solo: Fl (*Floresta*), Rg (*Regeneração*), Pa (*Pastagem*), Se (*Solo exposto*) e Au (*Área urbana*). Por fim, o número atribuído ao estrato (três dígitos) e o número do ponto (dois dígitos). Por exemplo, a nomenclatura AMoFl25632 corresponde ao ponto 32 do estrato 256, da classe *Floresta*, *Montanhoso* e com fins à avaliação altimétrica. No Apêndice B podem ser visto alguns exemplos de estratos.

### **3.4 Amostragem**

Existem diferentes métodos de obtenção de uma amostra probabilística de uma população, os quais são detalhados em Bolfarine e Bussab (2005). O método empregado para a seleção das amostras a serem levantadas em campo foi a amostragem estratificada, que melhor se adequa ao estudo dos cruzamentos das categorias de interesse uma vez que a população é dividida em sub-populações mutuamente exclusivas chamadas de estratos.

Esse tipo de amostragem consiste em selecionar uma amostra em cada estrato e combinar estas amostras numa única amostra para estimar parâmetros de uma população. Tem como vantagem o aumento da precisão das estimativas, possibilidade de obtenção de informações em nível de estrato, facilidade na coleta de dados, além de outras razões que podem ser consultadas em Silva (1998).

Para cada estrato foram selecionados pelo menos 30 pontos a serem levantados no trabalho de campo. Este número foi definido durante o planejamento de campo, após considerar que para as classes *Área urbana*, *Solo exposto* e *Pastagem* cada ponto levaria, segundo os dados dos fabricante, 20 min de rastreamento pelo GPS, e nas classes *Floresta* e *Regeneração* o levantamento seria por Estação Total.

### 3.5 Levantamento de Campo

Para a realização do levantamento de campo, foi ocupado o mesmo ponto base que o utilizado por ocasião do vôo de imageamento, como mostrado na Figura 3.5. Não por acaso, a área de estudo foi delimitada por esse ponto estar situado no centro da área. Esse vértice foi materializado no dia 17 de novembro de 2008 após aproximadamente 3 h 20 min de rastreamento com o equipamento Trimble 5700 II, altura da antena 1,410m, resultando após o processamento nas precisões horizontal de 0,007m, vertical 0,025m.

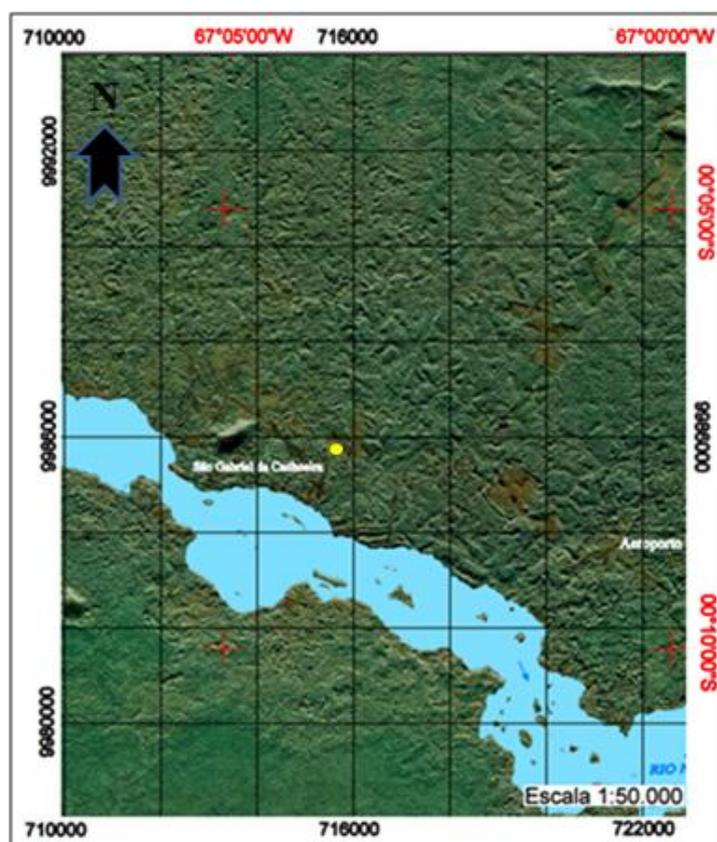


Figura 3.5 – Localização da estação de referência dentro da área de estudo.

De acordo com a Trimble (2005), fabricante dos receptores, as equações de acurácia horizontal e vertical estão descritas na Tabela 3.3, onde  $D_i$  é a distância (em quilômetros) entre o receptor base e o remoto e ppm significa parte por milhão. Essas equações permitem ao usuário inferir previamente qual será sua acurácia para uma dada distância dos receptores.

Tabela 3.3 – Precisão do receptor Trimble L1/L2 empregado.

Método	Acurácia horizontal	Acurácia vertical
Estático / Estático Rápido	$5\text{mm} + 0,5\text{ppm} \times D_i$	$5\text{mm} + 1\text{ppm} \times D_i$

FONTE: Trimble (2005).

Como as distâncias entre os pontos a serem levantados e a base raramente excederam os 10 km, esperava-se que as acurácias horizontais e verticais fossem de no máximo 1,0 cm e 1,5 cm, respectivamente. Tal expectativa foi confirmada para rastreios de 10 min de duração. Entretanto, optou-se por 20 min como tempo padrão uma vez que a região nem sempre apresentava as adequadas condições de trabalho, como por exemplo ausência de obstrução por florestas primárias.

O método de posicionamento relativo estático foi utilizado para o levantamento dos pontos de apoio e para avaliação planimétrica, sendo alguns monumentados para posterior utilização no levantamento topográfico. O método de seleção desses pontos está vinculado ao ponto ser monoscopicamente identificável na ortoimagem SAR, ou seja, ser inequívoca sua localização.

Para o levantamento de campo, os pontos candidatos à amostragem advinham de uma malha de pontos distantes 100 m entre si e não pertencentes a regiões de fronteira de estratos. Isso foi possível pela implementação do *buffer* de 5 m por estrato, criando assim corredores de exclusão. Amostrados em gabinetes, tais pontos eram previamente inseridos em receptores de navegação para facilitar suas localizações. Com 3 equipes trabalhando, cada uma navegava com os receptores GPS até a proximidade dos pontos, onde então procurava uma posição favorável com pouca ou nenhuma obstrução. Determinado esse local, era realizada uma confirmação das características procuradas com as encontradas. O gradiente de declividade era identificado e medido com Estação

Total no decaimento mais proeminente da vertente. Esse procedimento foi obrigatório uma vez que os gradientes de declividade foram obtidos do próprio modelo digital do terreno a ser avaliado. O uso do solo também foi verificado e, caso houvesse divergência com a classificação de uso e cobertura do solo obtida anteriormente na imagem óptica, o ponto era alterado para o respectivo estrato.

De acordo com a Topcon (2008), fabricante das Estações Totais, as mesmas podem realizar medições de até 3.000m. A equação de precisão da Medição de Distância para o Modo Prisma e a precisão para a Medição Angular Eletrônica estão descritas na Tabela 3.4, onde  $D_i$  é a distância (em milímetros) entre a Estação Total e o prisma e ppm significa parte por milhão.

Tabela 3.4 – Precisão da Estação Total Topcon série CTS-3000 empregada.

Medição de Distância	Modo Prisma	$\pm(3\text{mm} + 2\text{ppm} \times D_i)$
Medição Angular Eletrônica	Precisão (desvio padrão)	5''

FONTE: Topcon (2008).

Essas especificações permitiram verificar a calibração das 2 Estações Total antes da realização dos levantamentos de campo propriamente dito na Área de Estudo. Ainda na sede foram executas 2 poligonais para cada equipamento, cada uma por um operador, com o objetivo de verificar se os controles linear, angular e azimutal atendiam às especificações do fabricante. Como tais expectativas foram confirmadas, os equipamentos foram considerados aptos para a realização dos levantamentos previstos.

Foi confeccionada ainda, para cada equipe, uma relação com todos os pontos passíveis de serem amostrados. Isso se fez necessário para que não houvesse perda do escasso tempo disponível. Tal ferramenta contribuiria para remediar a hipotética situação de um determinado ponto amostrado não atender as características buscadas. Assim, o chefe da equipe poderia identificar os pontos mais próximos de sua localização candidatos a atender a determinadas características.

Os processamentos de todos os dados de campo foram realizados por um único membro do grupo de trabalho. Tal elemento não foi sobrecarregado com outras atividades, o que

possibilitou manter constância de procedimentos e melhorar a qualidade nessa fase do processo.

O padrão de materialização dos pontos que oferecessem a melhor relação entre praticidade e durabilidade foi o uso de piquetes. Esse procedimento possibilitaria a reocupação dos pontos caso necessário. Para cada ponto materializado, era também cravada outra estaca de madeira a aproximadamente 1 m, sendo ali escrito o nome do ponto.

Para anotar os dados do levantamento, foram confeccionadas Cadernetas de Campo específicas para esse trabalho (APÊNDICE A). Sua confecção teve por referência documentos afins utilizados pela DSG, 1ª e 4ª DL (Divisão de Levantamento), IEAV (Instituto de Estudos Avançados) e INPE e possuía todos os dados considerados fundamentais.

Foram levantados aproximadamente 2000 pontos com rastreadores GPS e Estação Total. Todos os pontos coletados foram processados e avaliados em um programa específico do fabricante do GPS e da Estação Total. Primou-se por solucionar em campo, repetindo se necessário, as medições para os casos de solução flutuante de ambiguidade ou resultados com precisão inferior às acurácias horizontais e verticais de 1,0 cm e 1,5 cm, respectivamente. As coordenadas processadas foram exportadas no mesmo sistema de projeção (UTM) e datum (WGS-84) do MDT avaliado. Foi adotada a altitude elipsoidal referenciada ao WGS-84 por ser este o sistema de referência do GPS (não sofrendo degradação de precisão no processo de transformação para a altitude ortométrica) e do MDT fornecido. Na Figura 3.6 é apresentada a distribuição dos pontos medidos por estrato, de onde pode-se notar que a localização dos pontos ocorre nas proximidades de estradas ou das margens do rio. Isto se deve as condições de acessibilidade da região.

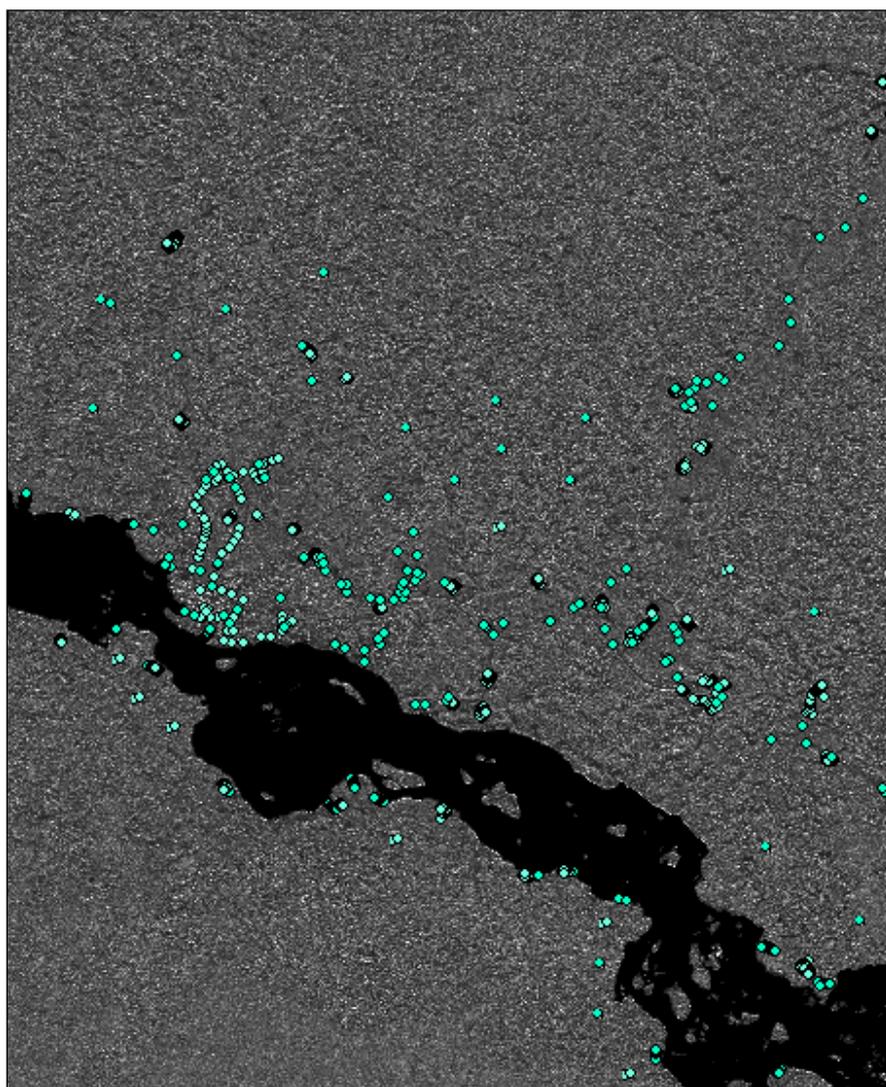


Figura 3.6 – Localização dos pontos medidos em campo.

### **3.6 Análise dos Dados**

Os fluxogramas das análises planimétrica e altimétrica podem ser vistos nas Figuras 3.7 e 3.8, respectivamente. A análise dos dados foi dividida em análise qualitativa e quantitativa.

A análise qualitativa constitui de uma inspeção visual da ortoimagem da banda X (HH) e no MDT a fim de detectar a presença de possíveis problemas. A análise quantitativa consistiu na aplicação de procedimentos estatísticos para a avaliação dentro das normas técnicas cartográficas nacionais, norte-americanas, propostas por Galo e Camargo

(1994) e na avaliação dos erros por classes de uso e cobertura do solo, classe de gradiente de declividade e classes conjuntas (estratos).

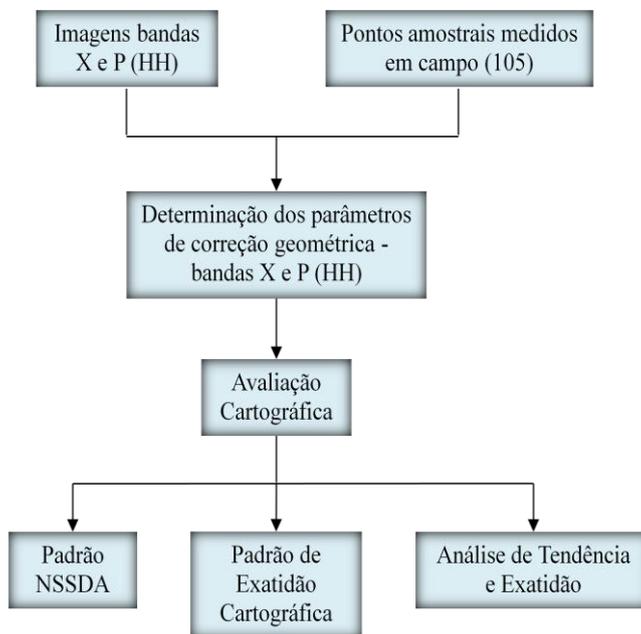


Figura 3.7 – Etapas da análise planimétrica dos dados.

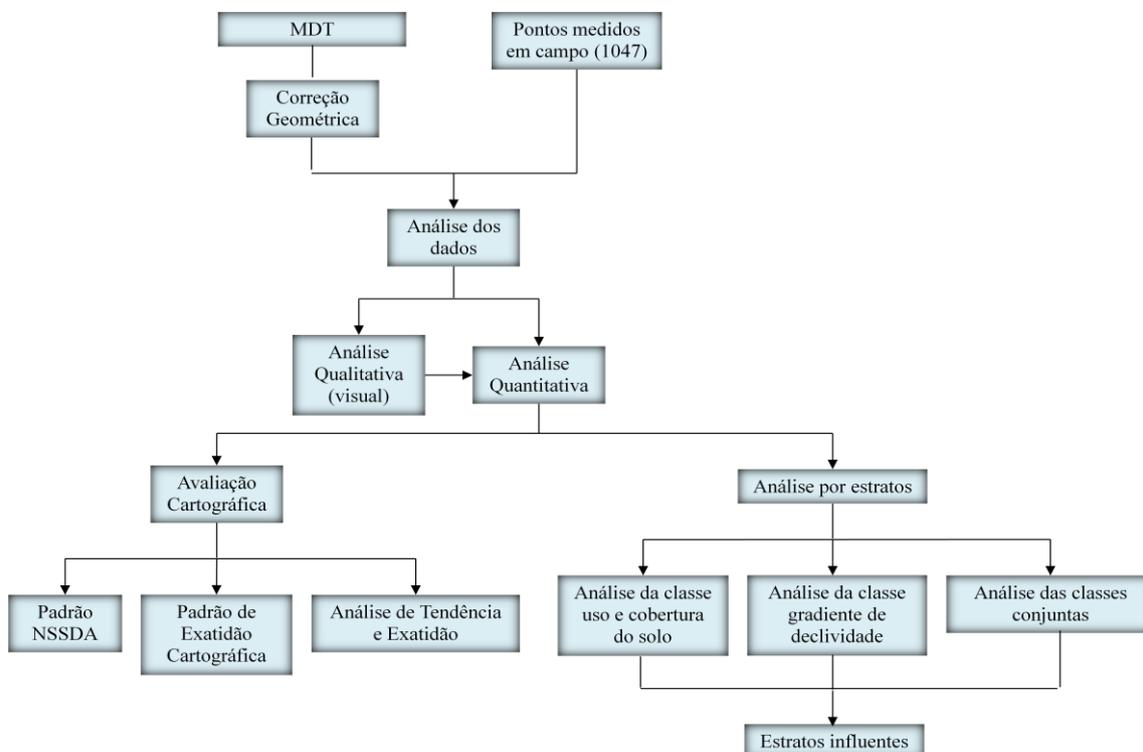


Figura 3.8 - Etapas da análise altimétrica dos dados.

### 3.6.1 Análise Planimétrica

Para a análise planimétrica inicialmente procedeu-se à identificação inequívoca, sobre a banda X, de 105 pontos previamente selecionados e medidos em campo para a determinação da possível necessidade de correção geométrica.

A análise da correção geométrica foi realizada em 3 etapas. Na primeira etapa foi definida a Transformação Afim como modelo a ser utilizado, e determinados os seus parâmetros para a banda X (HH), a partir de 105 pontos medidos em campo. Foram também calculados os erros planimétricos nas coordenadas Norte (N), Este (E) e de sua resultante (R) (equações 2.1 e 2.2). Igual procedimento se seguiu para a ortoimagem da banda P (HH), porém com somente 42 pontos, dos 105, que puderam ser monoscopicamente identificáveis. Finalmente, verificou-se se a mesma transformação poderia ser utilizada para as duas ortoimagens. Esta verificação consistiu em uma análise dos parâmetros da transformação, e de um teste de hipóteses sobre a igualdade de média dos erros planimétricos das duas ortoimagens em N, E e R. Em caso afirmativo, os parâmetros resultantes da banda X (105 pontos) seriam os parâmetros a ser utilizados para a correção do MDT da banda P.

A avaliação cartográfica consistiu na aplicação de três metodologias distintas: pela análise de tendência e exatidão, pelas normas brasileiras (PEC), e pelas normas do NSSDA.

A análise de tendência e exatidão consistiu na aplicação do modelo proposto por Galo e Camargo (1994) e definido na Seção 2.7.3:

- cálculo das discrepâncias ( $\varepsilon$ ) entre as coordenadas planimétricas observadas na ortoimagem banda X e as de referência (GPS);
- cálculo da média (equação 2.15) e desvio padrão (equação 2.16) das discrepâncias amostrais;
- teste t (equação 2.17) para a análise de tendência;

- teste  $\chi^2$  (equação 2.20) para a análise de exatidão;
- cálculo do mínimo valor do Denominador da Escala da Carta (equação 2.24), desconsiderando-se a tendência.

As análises segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica seguiram o exposto nas Seção 2.7.1. Para tal, através dos valores absolutos das discrepâncias  $\varepsilon$ , foi determinado o 90º centil ( $|\varepsilon|_{90\%}$ ), o qual corresponde ao valor de PEC utilizado no enquadramento do produto cartográfico nas classes A, B ou C.

A avaliação cartográfica através das normas do *National Standard for Spatial Data Accuracy* seguiram o exposto nas Seção 2.7.2, em que que foi computado o valor da acurácia horizontal através dos valores de RMSE nas direções N e E. Este valor de acurácia foi utilizada para o enquadramento da carta segundo os padrões do ASPRS (Tabela 2.6).

### 3.6.2 Análise Altimétrica

O primeiro procedimento foi aplicar a correção geométrica a partir dos parâmetros determinados na ortoimagem banda X (HH) na análise planimétrica .

Na análise qualitativa foram realizadas análises visuais para se buscar se pontos medidos em campo foram alocados, após a correção geométrica, em regiões sem informação altimétrica, bem como possíveis problemas no MDT, tais como: falhas no mosaico, regiões com altitudes anômalas em relação à vizinhança, regiões emersas sem informações de altitudes, etc. Para essa análise foi empregado o relevo sombreado da altimetria oriunda do MDT avaliado, pois segundo Maune (2007), empregar essa técnica oferece diferentes perspectivas de superfície.

A análise quantitativa foi realizada em três etapas. Na primeira etapa os erros altimétricos foram analisados globalmente, e na segunda foi feita uma análise dos erros para as diferentes classes de declividade, de uso e ocupação do solo, e para os estratos resultantes do cruzamento destas classes. Na terceira etapa as proporcionalidades de cada estrato, obtidas a partir das classificações, são consideradas na área de estudo.

Assim, através de estratificação prévia de uma área similar considerada, poder-se-ia ter a priori uma estimativa da precisão do produto cartográfico.

Tanto para a análise global quanto para a análise por estratos, a avaliação cartográfica foi efetuada pela análise de tendência e exatidão proposta por Galo e Camargo (1994), pelas normas brasileiras (PEC), e pelas normas do NSSDA.

Com base na metodologia proposta por Galo e Camargo (1994) e mostrada na Seção 2.7.3, os procedimentos adotados para a análise de tendência e precisão seguiram as seguintes etapas:

- cálculo das discrepâncias entre os valores das elevações observadas no MDT pelo interpolador Vizinho mais próximo, e as elevações de referência (GPS);
- cálculo da média (equação 2.15) e desvio padrão (equação 2.16) das discrepâncias amostrais;
- análise de tendência através do teste t (equação 2.17);
- análise de exatidão através do teste  $\chi^2$  (equação 2.20);
- cálculo do mínimo valor do Padrão de Exatidão Cartográfico (equação 2.28), desconsiderando-se a tendência.

Da mesma maneira que efetuado para a análise planimétrica, a análise altimétrica segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica consistiu em se determinar o 90º centil dos valores absolutos dos erros ( $|\varepsilon|_{90\%}$ ), o qual corresponde ao valor de PEC utilizado no enquadramento do produto cartográfico nas classes A, B ou C.

Para a avaliação altimétrica através das normas do *National Standard for Spatial Data Accuracy* foi calculado o valor da acurácia, o qual corresponde a 1,96 vezes o valor do RMSE.

Na análise por estratos objetivou-se, principalmente, identificar quais fatores afetam a acurácia posicional do MDT, quais os erros médios e desvios padrões de cada classe e

estrato, e quais desses eram os mais influentes. Essa análise se deu de 3 maneiras. Primeiramente, somente foi considerada a classe de uso e cobertura do solo, não levando em conta a que classe de gradiente de declividade pertence. Posteriormente, mesmo procedimento foi empregado para a declividade. Finalmente, o cruzamento dessas classes foi considerado. Testes paramétricos e não paramétricos foram utilizados nestas análises.



## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE PLANIMÉTRICA

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise planimétrica dos dados das ortoimagens bandas X (HH) e P (HH).

#### 4.1 Análise Descritiva dos Pontos Planimétricos

Para análise da planimetria das ortoimagens bandas X (HH) e P(HH), foram medidos em campo 105 pontos monoscopicamente identificáveis e pré-selecionados em gabinete sobre ortoimagem banda X (HH), distribuídos na área de trabalho conforme apresentado em amarelo na Figura 4.1. Tal análise visa fazer a avaliação cartográfica planimétrica, e efetuar a correção geométrica de modo a minimizar os erros de orientação do MDT original para uma avaliação altimétrica mais precisa. A avaliação foi inicialmente efetuada na banda X pelo fato dos pontos serem mais facilmente identificáveis nesta banda.

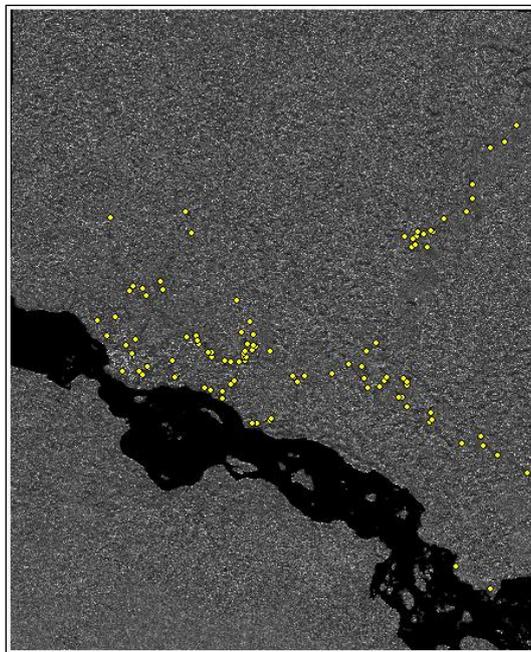


Figura 4.1 – Localização dos 105 pontos para a análise planimétrica sobre a ortoimagem banda X.

A Tabela 4.1 mostra os resíduos nas direções leste ( $\varepsilon_E$ ), norte ( $\varepsilon_N$ ) e o resultante ( $\varepsilon_R$ ), bem como vetores que orientam os sentidos dos deslocamentos. Ressalta-se que as direções leste ( $\varepsilon_E$ ) e norte ( $\varepsilon_N$ ) correspondem às direções *across track* e *along track* do imageamento. Adotou-se como referência o levantamento do rastreador GPS, sendo os resíduos calculados como definido na Equação 2.1. A Figura 4.2 ilustra os vetores de deslocamento tendo como parâmetro a observação das coordenadas na imagem. Se, por exemplo, seus valores forem superiores aos medidos em campo, o vetor resultante será o correspondente a  $\varepsilon_N$  e  $\varepsilon_E$  maiores que zero.

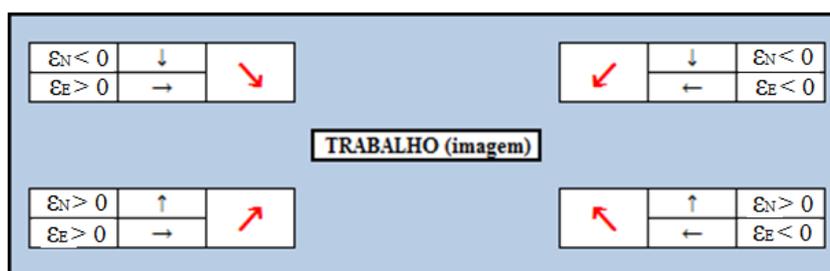


Figura 4.2 – Referencial para o cálculo dos resíduos.

Tabela 4.1 – Coordenadas e resíduos dos pontos de avaliação planimétrica.

Ponto	TRABALHO (imagem)		REFERÊNCIA (GPS)		(TRABALHO - REFERÊNCIA)					
	N	E	N	E	$\varepsilon_N$	vetor	$\varepsilon_E$	vetor	$\varepsilon_R$	vetor
1	9982784,17	722492,50	9982800,00	722490,00	-15,83	↓	2,50	→	16,03	↘
2	9983218,75	721747,50	9983233,75	721756,25	-15,00	↓	-8,75	←	17,37	↙
3	9983425,00	721400,00	9983437,37	721401,36	-12,37	↓	-1,36	←	12,44	↙
4	9983688,33	721350,83	9983691,88	721341,28	-3,54	↓	9,55	→	10,19	↘
5	9983492,83	720887,62	9983507,50	720891,25	-14,67	↓	-3,63	←	15,11	↙
6	9984010,83	720095,00	9984027,50	720096,25	-16,67	↓	-1,25	←	16,71	↙
7	9984090,61	720169,58	9984106,07	720171,43	-15,46	↓	-1,85	←	15,57	↙
8	9984262,06	720132,24	9984271,70	720127,05	-9,63	↓	5,18	→	10,94	↘
9	9984391,28	719548,44	9984407,50	719541,25	-16,22	↓	7,19	→	17,74	↘
10	9984645,03	719434,69	9984652,27	719432,69	-7,24	↓	2,00	→	7,51	↘
11	9984620,03	719350,10	9984636,52	719351,44	-16,49	↓	-1,33	←	16,54	↙
12	9984915,44	719570,42	9984933,54	719563,48	-18,10	↓	6,94	→	19,38	↘
13	9985023,57	719547,90	9985038,54	719543,48	-14,98	↓	4,42	→	15,61	↘
14	9985106,17	719467,23	9985123,11	719467,43	-16,94	↓	-0,20	←	16,94	↙

(Continua)

Tabela 4.1 – Continuação

Ponto	TRABALHO (imagem)		REFERÊNCIA (GPS)		(TRABALHO - REFERÊNCIA)					
	N	E	N	E	$\varepsilon_N$	vetor	$\varepsilon_E$	vetor	$\varepsilon_R$	vetor
15	9985053,25	718982,64	9985068,05	718987,85	-14,80	↓	-5,20	←	15,69	↙
16	9984905,33	718895,14	9984918,31	718893,18	-12,98	↓	1,96	→	13,12	↘
17	9985120,43	719045,99	9985136,35	719047,25	-15,92	↓	-1,26	←	15,97	↙
18	9984881,12	718585,40	9984882,50	718592,50	-1,38	↓	-7,10	←	7,23	↙
19	9985086,80	718488,32	9985101,47	718487,26	-14,67	↓	1,06	→	14,71	↘
20	9985404,42	718455,20	9985407,72	718448,51	-3,31	↓	6,69	→	7,46	↘
21	9985457,54	718113,95	9985473,60	718116,29	-16,06	↓	-2,34	←	16,23	↙
22	9985775,04	718573,95	9985793,24	718566,41	-18,20	↓	7,54	→	19,70	↘
23	9985985,04	718794,57	9985988,58	718792,32	-3,54	↓	2,25	→	4,20	↘
24	9988329,91	719649,83	9988342,50	719651,25	-12,59	↓	-1,42	←	12,67	↙
25	9988580,54	719499,21	9988596,95	719503,20	-16,42	↓	-3,99	←	16,90	↙
26	9988589,91	719787,33	9988596,55	719791,50	-6,64	↓	-4,17	←	7,84	↙
27	9988709,29	719809,83	9988722,01	719812,30	-12,72	↓	-2,46	←	12,96	↙
28	9988529,29	719694,21	9988542,75	719696,88	-13,46	↓	-2,67	←	13,73	↙
29	9988385,49	719745,48	9988391,50	719746,88	-6,01	↓	-1,40	←	6,17	↙
30	9988327,36	720052,35	9988342,47	720056,86	-15,11	↓	-4,50	←	15,77	↙
31	9988707,33	720197,98	9988708,31	720202,69	-0,98	↓	-4,71	←	4,81	↙
32	9988742,95	720139,65	9988757,98	720132,62	-15,03	↓	7,02	→	16,59	↘
33	9988666,91	719944,85	9988672,08	719943,22	-5,17	↓	1,63	→	5,42	↘
34	9989042,09	720442,11	9989053,33	720446,67	-11,25	↓	-4,56	←	12,14	↙
35	9989196,23	720992,60	9989212,50	720990,00	-16,27	↓	2,60	→	16,47	↘
36	9989533,94	721164,89	9989547,87	721167,05	-13,93	↓	-2,15	←	14,09	↙
37	9989873,53	721144,69	9989888,16	721141,89	-14,64	↓	2,79	→	14,90	↘
38	9990778,31	721592,66	9990797,43	721586,81	-19,13	↓	5,85	→	20,00	↘
39	9990915,46	721951,62	9990930,00	721947,50	-14,54	↓	4,12	→	15,11	↘
40	9991337,96	722218,29	9991354,25	722216,56	-16,29	↓	1,73	→	16,38	↘
41	9985009,42	716877,19	9985032,37	716871,94	-22,95	↓	5,25	→	23,54	↘
42	9985167,55	717039,67	9985178,62	717036,94	-11,07	↓	2,73	→	11,40	↘
43	9985130,05	716770,30	9985142,98	716776,88	-12,93	↓	-6,58	←	14,51	↙
44	9984049,52	716200,14	9984067,50	716195,00	-17,98	↓	5,14	→	18,70	↘
45	9984092,02	716224,51	9984106,46	716226,86	-14,44	↓	-2,35	←	14,63	↙
46	9983989,55	715885,30	9984006,46	715898,11	-16,91	↓	-12,81	←	21,22	↙
47	9983990,17	715754,67	9984012,50	715756,25	-22,33	↓	-1,58	←	22,38	↙
48	9985150,26	716744,87	9985168,75	716752,50	-18,49	↓	-7,63	←	20,00	↙
49	9985753,63	716185,47	9985772,50	716186,25	-18,87	↓	-0,78	←	18,88	↙
50	9985535,00	715574,46	9985551,35	715583,63	-16,35	↓	-9,17	←	18,75	↙

(Continua)

Tabela 4.1 – Continuação

Ponto	TRABALHO (imagem)		REFERÊNCIA (GPS)		(TRABALHO - REFERÊNCIA)					
	N	E	N	E	$\varepsilon_N$	vetor	$\varepsilon_E$	vetor	$\varepsilon_R$	vetor
51	9985618,52	715547,66	9985637,60	715548,63	-19,08	↓	-0,97	←	19,10	↙
52	9985617,27	715602,91	9985631,28	715608,46	-14,00	↓	-5,55	←	15,06	↙
53	9985707,79	715577,38	9985722,53	715573,46	-14,73	↓	3,92	→	15,24	↘
54	9985777,29	715595,38	9985783,06	715592,87	-5,77	↓	2,51	→	6,29	↘
55	9985811,54	715766,38	9985818,68	715758,32	-7,14	↓	8,06	→	10,77	↘
56	9985919,29	715772,38	9985927,83	715776,66	-8,54	↓	-4,28	←	9,55	↙
57	9985885,54	715854,63	9985898,01	715846,48	-12,47	↓	8,15	→	14,89	↘
58	9985944,79	715638,63	9985961,76	715637,33	-16,97	↓	1,29	→	17,02	↘
59	9986224,79	715492,13	9986237,34	715498,63	-12,55	↓	-6,50	←	14,13	↙
60	9986506,29	715720,59	9986517,34	715717,38	-11,05	↓	3,21	→	11,50	↘
61	9986167,79	715797,34	9986182,50	715791,25	-14,71	↓	6,09	→	15,92	↘
62	9985500,44	715450,38	9985518,75	715447,50	-18,31	↓	2,88	→	18,53	↘
63	9985045,85	715314,17	9985057,50	715311,25	-11,65	↓	2,92	→	12,01	↘
64	9984942,35	715244,67	9984958,48	715236,70	-16,13	↓	7,97	→	17,99	↘
65	9984769,82	715040,49	9984787,50	715036,25	-17,68	↓	4,24	→	18,18	↘
66	9984614,85	715015,38	9984622,65	715021,68	-7,80	↓	-6,30	←	10,03	↙
67	9984870,35	714598,88	9984887,54	714602,82	-17,19	↓	-3,94	←	17,63	↙
68	9984799,10	714754,13	9984811,85	714757,63	-12,76	↓	-3,50	←	13,23	↙
69	9985507,74	715254,70	9985523,03	715252,20	-15,29	↓	2,50	→	15,49	↘
70	9985532,74	715105,69	9985548,03	715102,20	-15,29	↓	3,49	→	15,69	↘
71	9985736,49	714681,19	9985753,06	714676,90	-16,58	↓	4,29	→	17,12	↘
72	9985621,99	714778,19	9985639,39	714778,61	-17,40	↓	-0,42	←	17,40	↙
73	9985734,24	714785,19	9985752,50	714782,50	-18,26	↓	2,69	→	18,46	↘
74	9985147,73	713912,63	9985163,75	713912,50	-16,02	↓	0,13	→	16,02	↘
75	9985947,44	714470,38	9985962,50	714466,25	-15,06	↓	4,13	→	15,61	↘
76	9986127,50	714167,00	9986138,03	714161,45	-10,53	↓	5,55	→	11,90	↘
77	9986129,50	714395,00	9986148,05	714396,75	-18,55	↓	-1,75	←	18,63	↙
78	9986034,50	714432,75	9986052,62	714433,53	-18,12	↓	-0,78	←	18,14	↙
79	9987024,81	715379,71	9987032,50	715377,50	-7,69	↓	2,21	→	8,00	↘
80	9985128,38	713864,74	9985142,50	713867,50	-14,12	↓	-2,76	←	14,38	↙
81	9985523,38	713820,24	9985546,51	713817,04	-23,13	↓	3,20	→	23,35	↘
82	9985175,63	713084,24	9985192,89	713082,50	-17,25	↓	1,74	→	17,34	↘
83	9985283,13	712993,24	9985296,43	712996,48	-13,30	↓	-3,25	←	13,69	↙
84	9985275,13	712580,24	9985291,43	712578,02	-16,30	↓	2,21	→	16,45	↘
85	9985700,63	712823,74	9985715,97	712822,50	-15,34	↓	1,24	→	15,39	↘
86	9985379,88	713204,49	9985398,75	713201,25	-18,87	↓	3,24	→	19,14	↘

(Continua)

Tabela 4.1 – Conclusão

Ponto	TRABALHO (imagem)		REFERÊNCIA (GPS)		(TRABALHO - REFERÊNCIA)					
	N	E	N	E	$\varepsilon_N$	vetor	$\varepsilon_E$	vetor	$\varepsilon_R$	vetor
87	9985920,08	712665,03	9985937,50	712666,25	-17,42	↓	-1,22	←	17,47	↙
88	9986055,33	712897,78	9986066,25	712902,50	-10,92	↓	-4,72	←	11,90	↙
89	9986145,06	712210,21	9986157,50	712212,50	-12,44	↓	-2,29	←	12,65	↙
90	9986527,56	711977,71	9986548,54	711976,28	-20,99	↓	1,43	→	21,03	↘
91	9986620,53	712404,97	9986638,54	712401,28	-18,01	↓	3,70	→	18,39	↘
92	9987245,94	712755,23	9987262,50	712757,50	-16,56	↓	-2,27	←	16,72	↙
93	9987298,94	713080,23	9987317,03	713077,53	-18,10	↓	2,71	→	18,30	↘
94	9987136,19	713170,48	9987152,50	713171,25	-16,31	↓	-0,77	←	16,33	↙
95	9987283,94	713587,23	9987298,60	713586,51	-14,66	↓	0,72	→	14,68	↘
96	9987468,94	713513,23	9987487,61	713512,01	-18,67	↓	1,23	→	18,71	↘
97	9987367,78	712864,24	9987387,50	712860,00	-19,72	↓	4,24	→	20,17	↘
98	9989057,46	712313,78	9989073,75	712312,50	-16,29	↓	1,28	→	16,34	↘
99	9989194,69	714133,04	9989207,50	714136,25	-12,81	↓	-3,21	←	13,21	↙
100	9988687,44	714273,00	9988703,75	714266,25	-16,31	↓	6,75	→	17,66	↘
101	9979904,66	721603,57	9979917,50	721601,25	-12,84	↓	2,32	→	13,05	↘
102	9980465,42	720749,34	9980483,75	720742,50	-18,33	↓	6,84	→	19,56	↘
103	9985212,88	717700,15	9985228,75	717701,25	-15,87	↓	-1,10	←	15,91	↙
104	9982740,00	722550,00	9982757,33	722547,30	-17,33	↓	2,70	→	17,54	↘
105	9982710,00	722535,00	9982722,46	722533,40	-12,46	↓	1,60	→	12,56	↘

A Tabela 4.2 mostra os valores de algumas grandezas estatísticas obtidas a partir dos dados constantes na Tabela 4.1.

Tabela 4.2 – Estatística descritiva dos resíduos da ortoimagem na banda X (HH).

	$\varepsilon_N$	$\varepsilon_E$	$\varepsilon_R$
<b>Média</b>	-14,36	0,54	15,14
<b>Mediana</b>	-15,29	1,28	15,77
<b>Desvio padrão</b>	4,42	4,34	3,96
<b>Erro padrão</b>	0,44	0,43	0,39
<b>Máximo</b>	-0,98	9,55	23,54
<b>Mínimo</b>	-23,13	-12,81	4,20

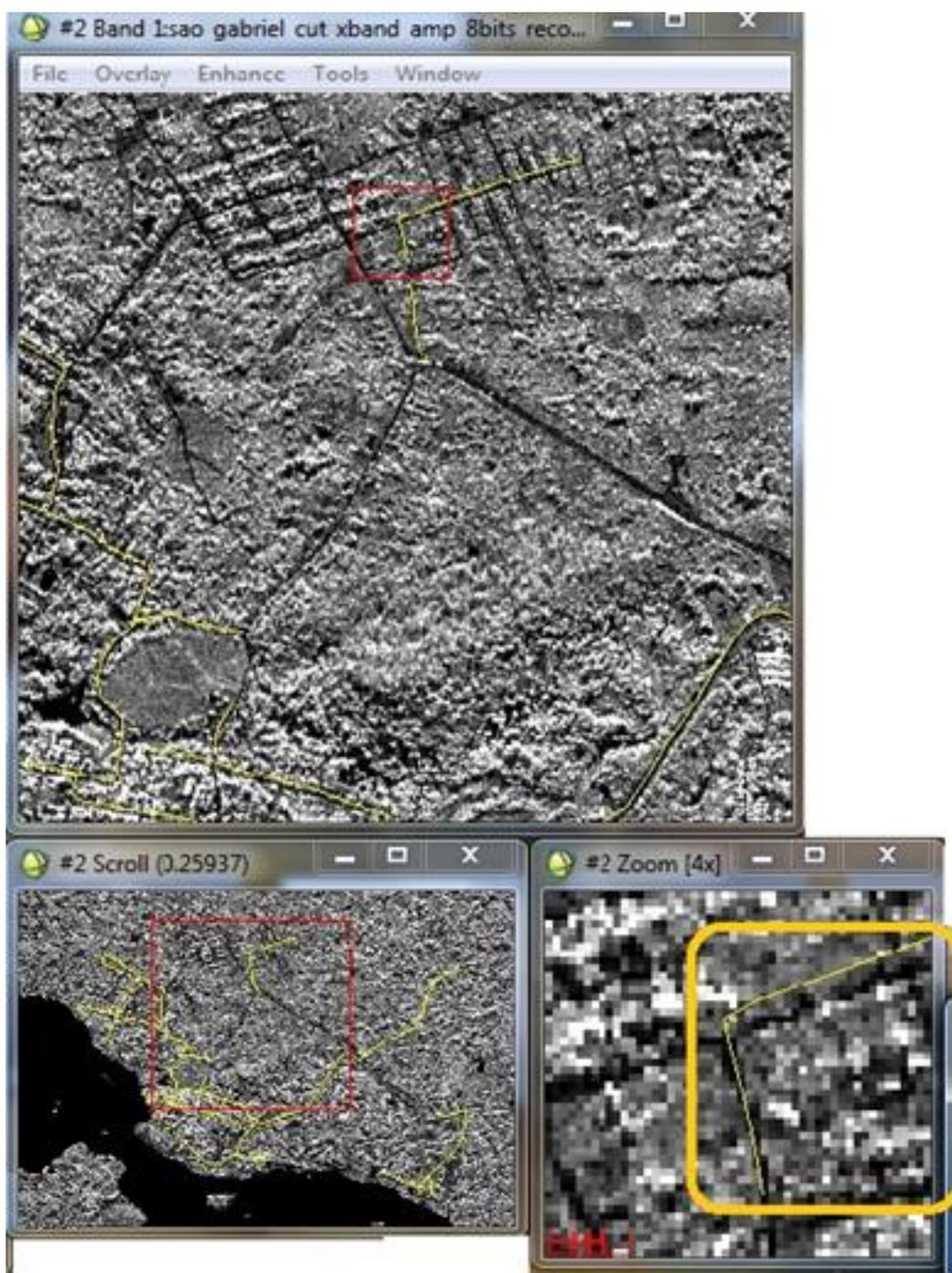


Figura 4.3 – Levantamento no modo cinemático na ortoimagem na banda X.

Da Tabela 4.2 pode-se verificar que há um deslocamento da ortoimagem de 14,36m para o sul e 0,54m para leste, com deslocamento (resíduo) médio total de 15,14m, o que corresponde a 3 vezes a resolução espacial da ortoimagem (5m). Isso fica visível na

Figura 4.3 em que é possível verificar nas feições lineares que se desenvolvem ora na direção norte-sul e leste-oeste, o deslocamento de 3 pixels nesta. A causa desse deslocamento deve-se ao fato desses produtos cartográficos não terem sido processados com as coordenadas dos *corners reflectors*. Como um MDT deve possuir projeção ortogonal e dispensar o uso de um novo georeferenciamento, isso implica obrigatoriamente na necessidade de correções geométricas antes da realização da avaliação altimétrica. Para tal foi utilizada a transformação afim, cujos 6 parâmetros calculados são mostrados na Tabela 4.3, a partir de 105, 95 e 85 Pontos de Controle (Pts Cont), e os resíduos dos respectivos Pontos de Verificação (Pts Verif), com seleção Aleatória Sistemática, podem ser vistos na Tabela 4.4.

Esses parâmetros fornecem informação sobre a geometria da imagem. A rotação informa se a imagem está rotacionada em relação aos eixos de referência. O fator de não-ortogonalidade mostra se as direções dos eixos x e y da imagem são ortogonais. Os fatores de escala informam se as escalas em cada eixo são iguais entre si e iguais à correta representação das feições do terreno. As translações informam sobre a necessidade de remover as tendências da imagem.

Tabela 4.3 – Parâmetros da Transformação Afim.

	<b>Pts Cont</b>	<b>Pts Verif</b>	<b>Pts Cont</b>	<b>Pts Verif</b>	<b>Pts Cont</b>	<b>Pts Verif</b>
	<b>105</b>	<b>0</b>	<b>95</b>	<b>10</b>	<b>85</b>	<b>20</b>
<b>Rotação</b>	0,01		0,01		0,01	
<b>Fator de não-ortogonalidade</b>	-0,01		-0,01		-0,01	
<b>Fator de escala em N</b>	1,00		1,00		1,00	
<b>Fator de escala em E</b>	1,00		1,00		1,00	
<b>Translação em N</b>	-14,36		-14,45		-14,56	
<b>Translação em E</b>	0,54		0,60		0,56	

Tabela 4.4 – Resíduos dos Pontos de Verificação.

	10 Pontos de Verificação		20 Pontos de Verificação	
	Resíduos		Resíduos	
Marlin	N	E	N	E
5	-5,21	-0,94	-5,35	-0,34
10			0,75	7,05
15	-6,27	-0,84	-6,30	-0,56
20			5,75	10,95
25	-4,69	-3,76	-4,57	-4,11
30			-5,22	-2,87
35	1,74	-4,37	1,86	-4,79
40			1,14	-6,31
45	-3,09	0,87	-3,11	1,27
50			-9,56	-1,13
55	7,62	7,80	7,69	7,87
60			2,97	3,64
65	3,79	-2,15	3,82	-1,89
70			3,19	0,09
75	3,91	0,32	4,01	0,35
80			-2,91	1,91
85	1,26	0,74	1,38	0,78
90			1,88	-4,98
95	0,83	0,63	1,01	0,40
100			7,16	-2,19
<b>Média</b>	-0,01	-0,17	0,28	0,26
<b>Desvio padrão</b>	4,37	3,19	4,63	4,32

Comparando as Tabelas 4.4 e 4.2, pode-se verificar que a médias dos resíduos dos pontos de verificação podem ser consideradas iguais a zero.

Como resultado final sobre a ortoimagem na banda X (HH), observa-se que para a correção geométrica são necessárias translações nas direções N e E, de -14,36 e 0,54m, respectivamente. Porém, pode-se considerar desprezível a translação na direção E devido ao pixel da ortoimagem ser de 5m.

Para se verificar se a ortoimagem na banda P possuía os mesmos erros planimétricos observados na banda X, a mesma análise descrita anteriormente foi executada sobre a

ortoimagem na banda P. Entretanto, dos 105 pontos utilizados, somente 42 foram identificados na ortoimagem. As estatísticas desses dados são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Estatística descritiva dos resíduos da ortoimagem banda P (HH).

	$\varepsilon_N$	$\varepsilon_E$	$\varepsilon_R$
<b>Média</b>	-13,00	0,96	14,25
<b>Mediana</b>	-13,36	1,25	14,12
<b>Desvio padrão</b>	5,23	4,56	3,76
<b>Erro padrão</b>	0,80	0,70	0,57
<b>Máximo</b>	9,45	12,96	29,40
<b>Mínimo</b>	-29,38	-11,16	6,88

Comparando-se as tabelas 4.2 e 4.5, pode-se observar a semelhança entre as estatísticas nas duas bandas.

A fim de testar se as médias e variâncias dos erros nas duas ortoimagens eram iguais, foram realizados o teste-*t* e o teste *F*, pareados, respectivamente para as componentes N, E, e R. O valores-*p* são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Teste *t* e teste *F* para as ortoimagens bandas X (HH) e P (HH).

	$\varepsilon_N$	$\varepsilon_E$	$\varepsilon_R$
<b>Teste <i>t</i> (valor-<i>p</i>)</b>	0,15	0,76	0,37
<b>Teste <i>F</i> (valor-<i>p</i>)</b>	0,31	0,29	0,77

Os resultados (valor-*p* > 0,05) apontam que estatisticamente não há diferenças significativas entre os erros médios e suas variâncias nas componentes N, E e R. Portanto, pode-se utilizar os parâmetros de correção geométrica obtidos a partir dos 105 pontos sobre a ortoimagem na banda X (HH), para efetuar as correções geométricas nas duas bandas.

## 4.2 Análise de Tendência e Precisão

Os resultados obtidos na análise de tendência são apresentados na Tabela 4.7. A hipótese nula de que a média dos erros planimétricos é igual a zero nas coordenadas N, E e R somente é aceita para a coordenada em E. Isso significa que essa direção é considerada isenta de tendência ao nível de significância de 5%. Nas demais coordenadas a hipótese nula é rejeitada a qualquer nível de significância prático (valor- $p < 0,0001$ ). Portanto, considerando a resultante R, pode-se afirmar que a ortoimagem banda X (HH) não pode ser considerada livre de tendências significativas.

Tabela 4.7– Estatística descritiva e resultado da análise de tendência ortoimagem na banda X.

	$\varepsilon_N$	$\varepsilon_E$	$\varepsilon_R$
<b>Média</b>	-14,36	0,54	15,14
<b>Desvio padrão</b>	4,42	4,34	3,96
<b>t amostral</b>	-33,32	1,28	39,19
<b>t (104, 5%)</b>	1,98		
<b>valor-p</b>	< 0,0001	0,10	< 0,0001

Para a análise de precisão, em que a hipótese nula de que o desvio padrão dos erros planimétricos é menor ou igual ao desvio padrão esperado para a classe desejada (denominado no PEC por erro padrão), as estatísticas  $\chi^2$ , calculadas segundo a equação 2.21, são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8– Estatística descritiva e resultado da análise de precisão da ortoimagem na banda X

	<b>Escalas</b>	
	<b>1:10.000</b>	<b>1:25.000</b>
<b><math>\chi^2</math> classe A (valor-p)</b>	450,66 (< 0,0001)	72,11 (0,99)
<b><math>\chi^2</math> classe B (valor-p)</b>	162,24 (0,0002)	25,96 ( $\approx 1,0$ )
<b><math>\chi^2</math> classe C (valor-p)</b>	112,67 (0,26)	18,03 ( $\approx 1,0$ )
<b><math>\chi^2</math> (104, 5%)</b>	128,80	

Caso a tendência seja removida e os dados sejam normalmente distribuídos, verifica-se pela Tabela 4.8 que, ao nível de significância de 5%, o padrão cartográfico de Classe A somente seria atendido para a escala de 1:25.000, enquanto que para as Classes B e C, o padrão cartográfico seria atendido na escala 1:25.000 e 1:10.000, respectivamente.

#### **4.3 Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira**

Pelas normas técnicas é necessário que pelo menos 90% dos pontos planimétricos (95 pontos) não apresentem erro superior ao PEC planimétrico estabelecido. Verificou-se que 90% dos erros planimétricos foram inferiores a 19,56m. Portanto, segundo a Tabela 2.5, a ortoimagem na banda X (HH) atenderia os padrões cartográficos da classe A na escala 1:50.000, e classes B e C na escala 1:25.000.

No entanto, corrigindo geometricamente a ortoimagem a partir dos parâmetros de translações determinados para as coordenadas N (-14,36m) e E (0,54m), 90% dos erros planimétricos foram inferiores a 9,31m. Portanto, a ortoimagem na banda X (HH) atenderia os padrões cartográficos das classes A e B na escala 1:25.000, e C na escala 1:10.000.

#### **4.4 Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas do NSSDA**

Para se determinar a acurácia horizontal, foram determinados os valores do RMSE nas coordenadas N e E. Os erros oriundos da ortoimagem na banda X (HH) original foram de 15,21 m e 4,55 m, respectivamente. Esses erros, segundo essas normas, recaem no caso em que se considera os valores do RMSE diferentes entre si ( $RMSE_N \neq RMSE_E$ ). Logo, o cálculo da acurácia é dado pela Equação 2.13. Pode-se afirmar então que o conjunto de dados testados apresentou aproximadamente 24,18m de acurácia horizontal a 95% de nível de confiança. Esse valor de acurácia permite determinar a escala máxima, segundo o ASPRS, a partir do DEC calculado segundo a Equação 2.14. Pode-se verificar por estes padrões que a escala final será 1:96.720.

No entanto, corrigindo geometricamente a ortoimagem, os valores dos RMSE passam a ser nas coordenadas N, E e R, 4,64m, 4,50m, 6,54m, respectivamente. Assim, os valores

dos RMSE recaem no caso em que podem ser considerados iguais ( $RMSE_N = RMSE_E$ ). Nesse caso usa-se a Equação 2.12 para se determinar a acurácia horizontal. Esse valor de acurácia (11,31m) permite determinar a escala máxima, segundo o ASPRS, calculados da mesma forma que anteriormente. Pode-se verificar que por estes padrões a escala final será 1:45.278.

#### 4.5 Comparação dos resultados

As análises apresentadas nas Seções 4.2 a 4.4 são mostradas na Tabela 4.9, onde se percebe que os resultados das análises de tendência e precisão coincidem com as normas brasileiras desde que sejam removidas as tendências.

Tabela 4.9– Comparação dos resultados da análise planimétrica.

Norma		Escala final		
<b>Galo e Camargo</b>		PEC A: 1:25.000	PEC B: 1:25.000	PEC C: 1:10.000
<b>Brasileira</b>	<b>(ortomagem original)</b>	PEC A: 1:50.000	PEC B: 1:25.000	PEC C: 1:25.000
	<b>(ortomagem corrigida)</b>	PEC A: 1:25.000	PEC B: 1:25.000	PEC C: 1:10.000
<b>NSSDA</b>	$RMSE_N \neq RMSE_E$	Acurácia: 24,18 m		Escala: 1:96.720
	$RMSE_N = RMSE_E$	Acurácia: 11,31 m		Escala: 1:45.278

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE ALTIMÉTRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise altimétrica dos dados do modelo digital do terreno obtidos a partir do MDT da banda P e já corrigido com os resultados apresentados na análise planimétrica. Inicialmente, na seção 5.1, são mostrados os resultados da estratificação da área de estudo. Na seção 5.2 são feitas considerações a respeito dos pontos medidos em áreas correspondentes às terras emersas sem informação de altimetria. Na seção 5.3 é feita uma análise descritiva das altitudes e de seus erros, tanto para as nuvens de pontos coletados com o uso da Estação Total; como para os demais pontos. Nas seções 5.4 a 5.6 é efetuada uma análise global de tendência e precisão dos dados, sob as normas técnicas da cartografia nacional e da cartografia norte-americana, baseadas no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e no *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), respectivamente. Nas seções subsequentes é efetuada uma análise dos fatores (classes de gradientes de declividade, classes de uso e cobertura do solo, e estratos resultante da interação destas classes) que influenciam os erros altimétricos.

#### 5.1 Estratificação da Área de Estudo

A Figura 5.1 apresenta o resultado da extração no MDT das classes de gradiente de declividade. É possível observar um predomínio de regiões planas pela grande área verde, características da região do Alto Rio Negro.

A Figura 5.2 apresenta a estratificação da área de estudo em classes de uso e cobertura do solo. Nota-se a predominância da classe *Floresta* em toda a área de estudo e a presença do rio Negro (em azul). Ao longo da Rodovia BR-307, sentido Cucuí, vê-se áreas de *Regeneração*, fruto da expansão urbana. Apesar de não haver criação de bovinos e cultivo agrícola em larga escala, percebe-se grandes áreas classificadas como *Pastagem*, áreas essas oriundas do processo de desmatamento. A mancha urbana (em vermelho) representa

a cidade de São Gabriel da Cachoeira que se desenvolve principalmente à margem esquerda do Rio Negro. O *Solo Exposto* (em amarelo) é resultado da pavimentação dos arruamentos do município, bem como de áreas de retirada de matéria-prima para as camadas inferiores durante o processo de asfaltamento, mais especificamente ao atualmente executado pela Companhia de Engenharia do Exército Brasileiro, na BR-307, distante 100 km do município de São Gabriel da Cachoeira. Devido à constante presença de nuvens na imagem óptica foi necessário especificar as classes de *Nuvem* e respectivas *Sombras*, em razão da incerteza causada por estas classes na classificação das classes de seu uso e cobertura do solo.

O mapa de estratos obtido pelo cruzamento das categorias de gradiente de declividade e uso e cobertura do solo é mostrado na Figura 5.3. Percebe-se ao comparar as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 diversas áreas com ausência de informações altimétricas no modelo digital de terreno da banda P. Tais áreas, são destacadas em preto no MDT da Figura 5.4, totalizam aproximadamente 9% das terras emersas e geram incerteza sobre a verdadeira declividade dessas regiões.

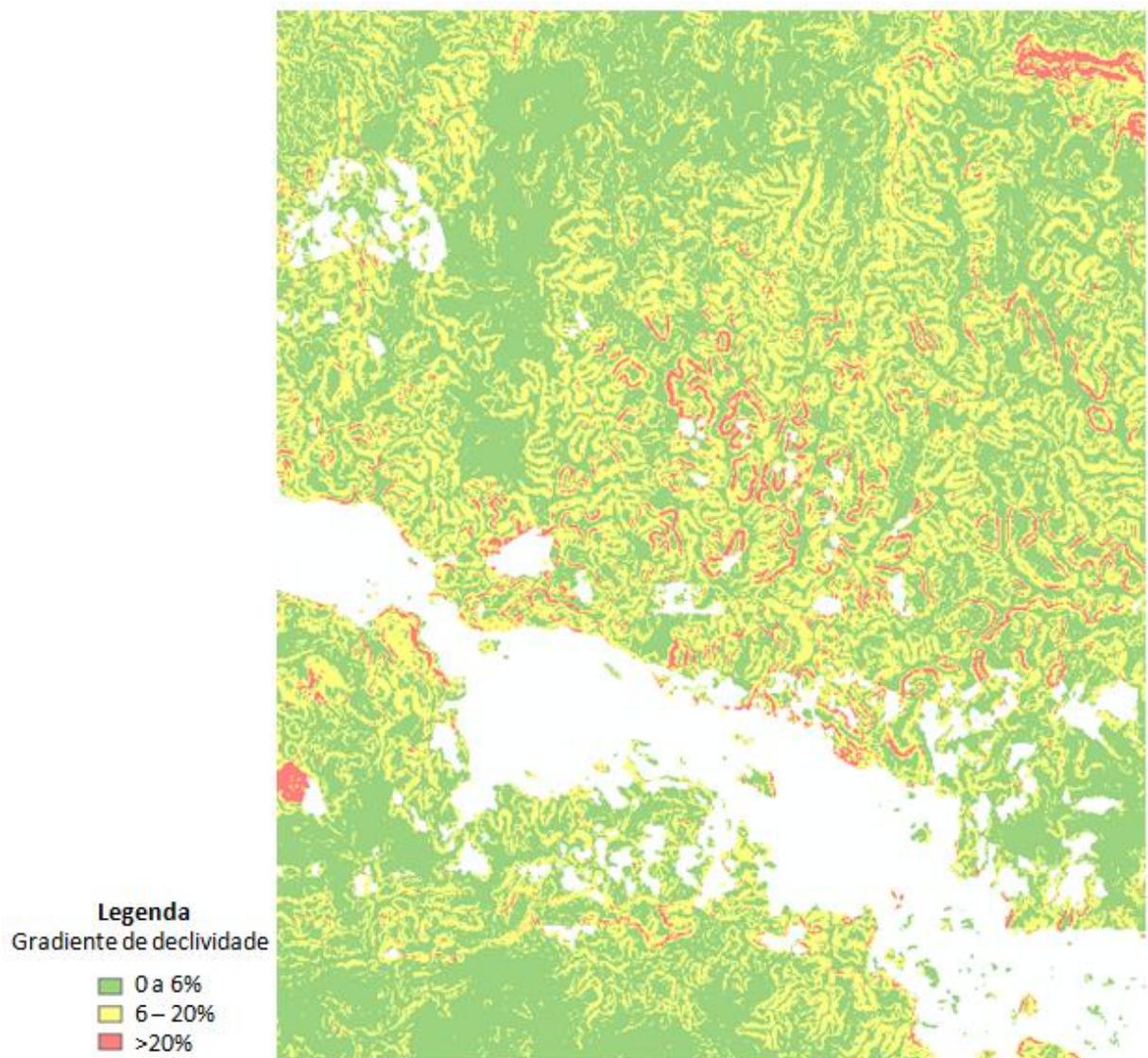


Figura 5.1 – Mapa de classes de gradiente de declividade da área de estudo.

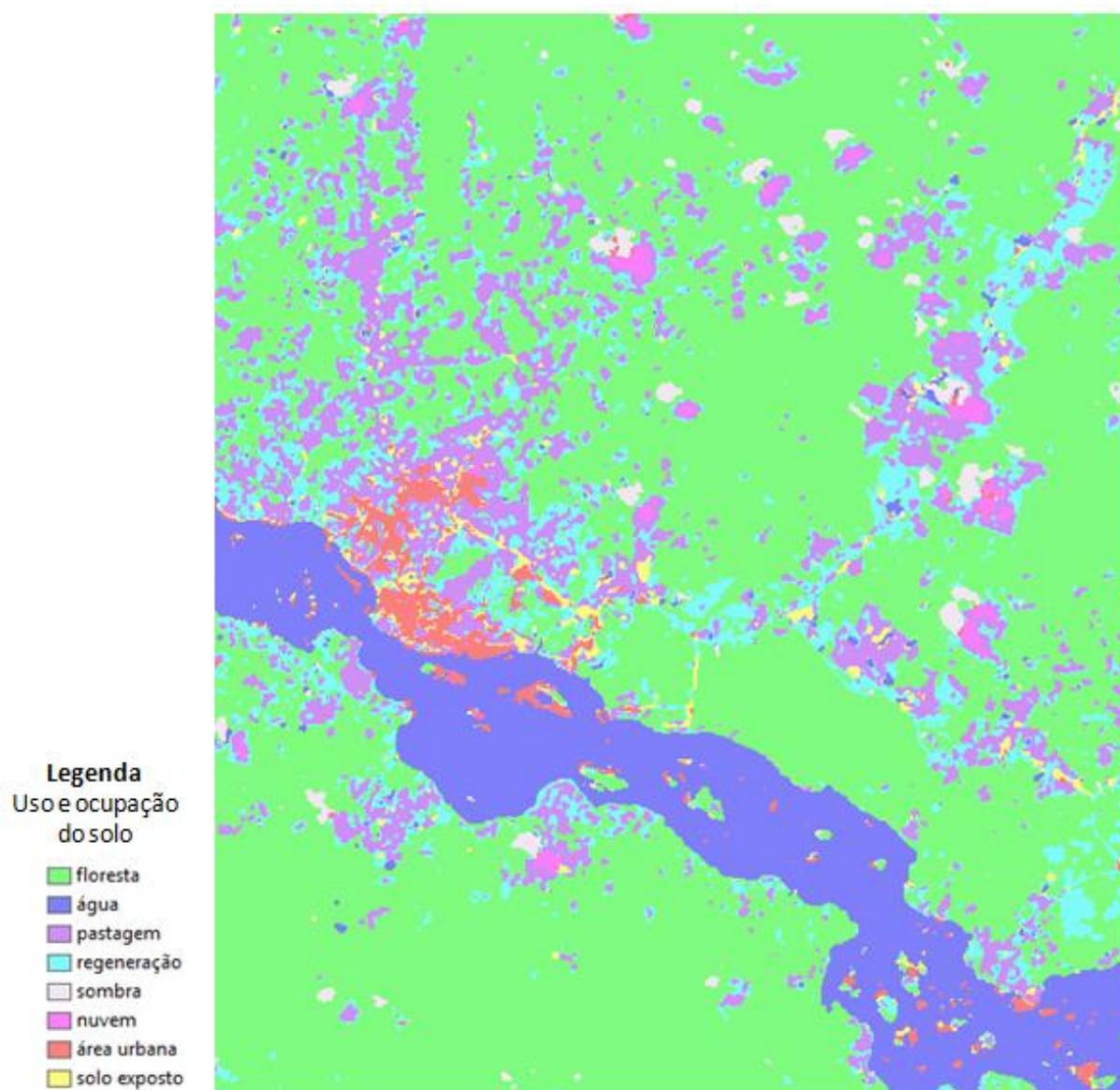


Figura 5.2 – Mapa de classes de uso e cobertura do solo da área de estudo.

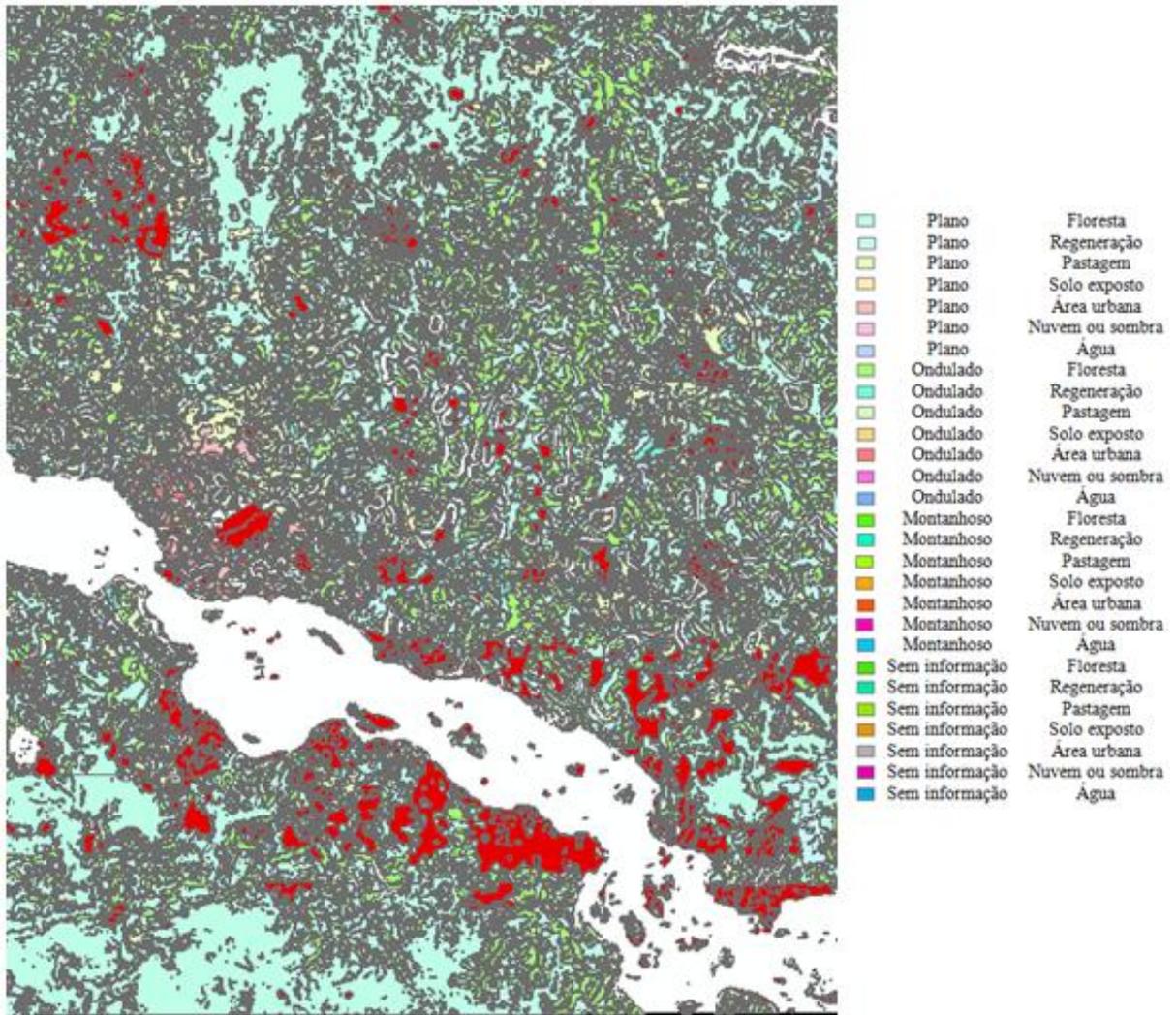


Figura 5.3 – Mapa de estratos da área de estudo.

Do mapa de estratos apresentado na Figura 5.3, resultado da intersecção das classes gradiente de declividade e de uso e cobertura do solo, foram extraídas as áreas totais de cada estrato presente na área de estudo. Os valores percentuais da área de cada estrato (relativos à área total da área de estudo) são apresentados na Tabela 5.1. No cômputo da área total excluiu-se a área correspondente ao rio Negro, que é representada na cor branca na Figura 5.3.

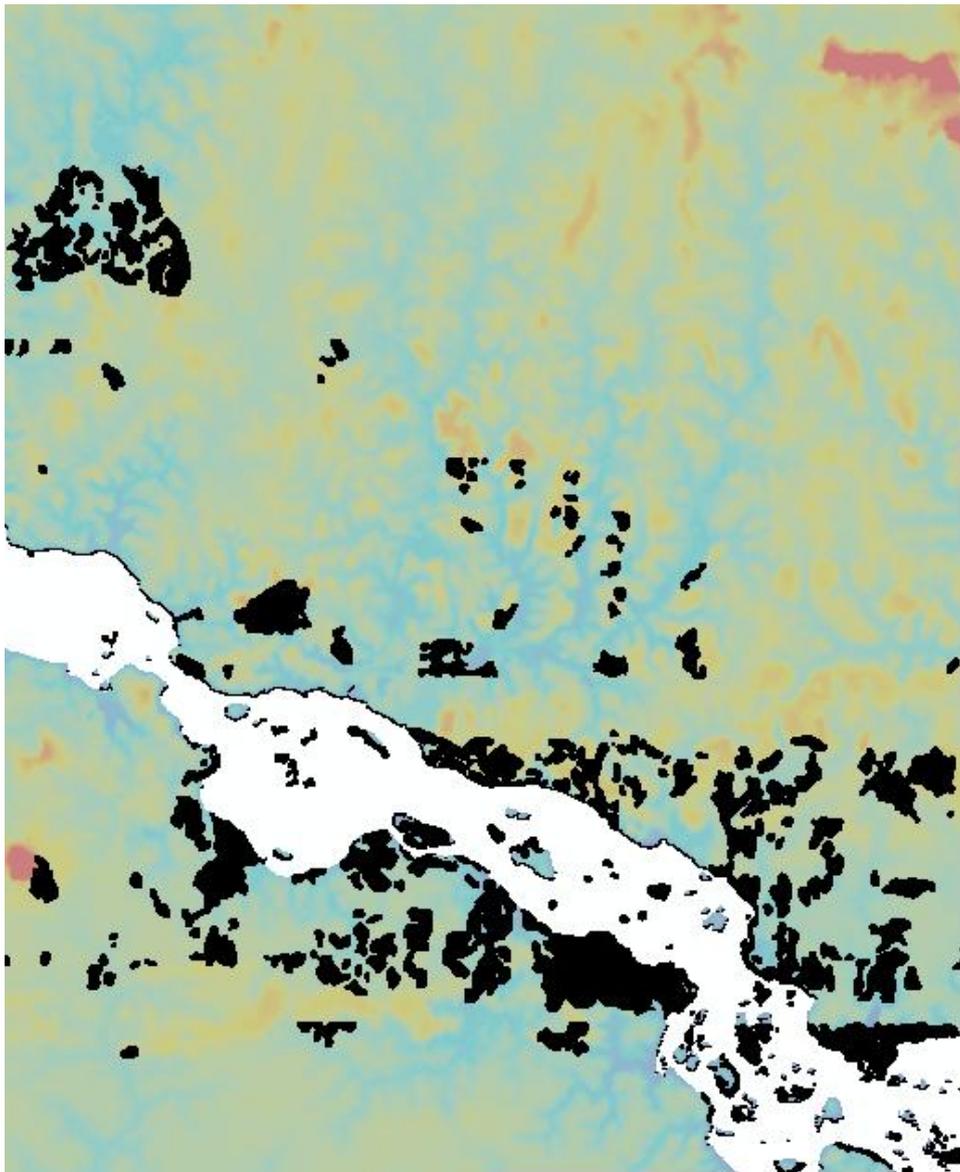


Figura 5.4 – MDT mostrando áreas sem informação altimétrica (em preto).

Tabela 5.1 – Percentual das áreas dos estratos presentes na área de estudo.

		Gradiente de declividade				Total
		<i>Plano</i>	<i>Ondulado</i>	<i>Montanhoso</i>	<i>Sem informação de declividade</i>	
Uso e cobertura do solo	<i>Solo Exposto</i>	0,53	0,28	0,04	0,06	0,92
	<i>Pastagem</i>	5,44	5,20	0,29	1,41	12,34
	<i>Regeneração</i>	4,53	2,78	0,15	0,85	8,32
	<i>Floresta</i>	44,79	21,08	2,14	6,12	74,13
	<i>Área Urbana</i>	0,63	0,48	0,03	0,08	1,22
	<i>Nuvem</i>	0,30	0,32	0,06	0,02	0,69
	<i>Sombra</i>	0,87	0,37	0,02	0,00	1,26
	<i>Água</i>	0,35	0,21	0,03	0,54	1,13
	<b>Total</b>	57,44	30,72	2,76	9,08	

Da Tabela 5.1 nota-se que na área de estudo há um predomínio (aproximadamente 66%) da classe de uso e cobertura do solo *Floresta*, ocorrendo principalmente em regiões cuja declividade foi classificada como *Plano* ou *Ondulado*. Pode-se observar também que a maior parte (em torno de 88%) da área estudada possui gradiente de declividade inferior a 20%, ou seja, das classes *Plano* e *Ondulado*.

## 5.2 Áreas sem Informação Altimétrica no MDT

Para essa análise foram levantados em campo 175 pontos em áreas correspondente à terras emersas, mas sem informação altimétrica no MDT. Esses pontos foram, e serão, considerados quanto à sua altimetria e classes de gradiente de declividade e uso e cobertura do solo. Esse levantamento teve por objetivos: 1) verificar se há um predomínio da ausência de informação do MDT (banda P) fornecido pela empresa OrbiSat da Amazônia Ind. e Aerolevantamento S.A. em algumas das classes consideradas; e 2) avaliar o MDT processado pela DSG nessas áreas, uma vez solucionado o problema de ausência de informações altimétricas pela DSG.

Como mostrado na Figura 5.4 e na Tabela 5.1, o MDT apresenta aproximadamente 9% da área de estudo sem informação altimétrica. Tais áreas, como explicado na

seção 3.3.2.2, vieram a compor os estratos de classe *Sem informação de declividade* (Sd) e foram igualmente amostradas, tendo por resultado o apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Número e estrato dos pontos medidos na classe Sem informação da declividade.

	<i>Plano</i>	<i>Ondulado</i>	<i>Montanhoso</i>	<i>Total</i>
<i>Solo Exposto</i>	47	-	-	47 (26,9%)
<i>Pastagem</i>	-	16	10	26 (14,9%)
<i>Regeneração</i>	40	22	-	62 (35,4%)
<i>Floresta</i>	12	18	10	40 (22,8%)
<i>Área Urbana</i>	-	-	-	-
<b>Total</b>	99 (56,6%)	56 (32%)	20 (11,4%)	175

Percebe-se da Tabela 5.2 que, para os pontos amostrados e medidos em campo, as classes de gradiente de declividade predominaram no *Plano*, seguido do *Ondulado*. Para uso e cobertura do solo, prevaleceu a classe *Regeneração*, não obstante a classes *Floresta* ser a classe de uso e cobertura do solo de maior ocorrência na área estudada.

### 5.3 Análise Descritiva dos Pontos Altimétricos

Para análise da altimetria do MDT da banda P foram medidos em campo 1518 pontos. Desses, 471 foram coletados com estação total por irradiação, vindo a constituir 3 nuvens de pontos, e 1047 com rastreadores GPS ou Estação Total. Na análise dos erros altimétricos foram calculados, em cada ponto, através da diferença entre as altitudes obtidas a partir do MDT e do GPS ( $\varepsilon_{iZ} = Z_{obs_i} - Z_{ref_i}$ , onde  $Z$  é a coordenada altimétrica). Ou seja, as coordenadas altimétricas de observação e de referência são as altitudes obtidas através do MDT na banda P, pelo interpolador Vizinho mais próximo, e do GPS ou estação total, respectivamente.

### **5.3.1 Nuvens de Pontos**

O objetivo desta análise foi verificar o comportamento dos erros utilizando pontos levantados em campo por irradiação com Estação Total. A DSG previamente definiu 3 grandes regiões para, que dentro de cada uma delas e após o reconhecimento desses locais, fosse selecionada uma área a ser medida a partir de alguns pré-requisitos. Basicamente foi definido que as áreas deveriam possuir cobertura vegetal rasteira e permitir o irradiação de no mínimo 150 pontos em todas as direções. A partir dessas pré-definições, buscou-se áreas que contemplassem o maior número de classes de gradiente de declividade.

As 3 nuvens de pontos foram denominadas por Nuvem 1, Nuvem 2 e Nuvem 3. Suas localizações dentro da área de estudo são apresentadas na Figura 5.5, sendo levantados para cada uma delas, 158, 153 e 160 pontos, respectivamente.

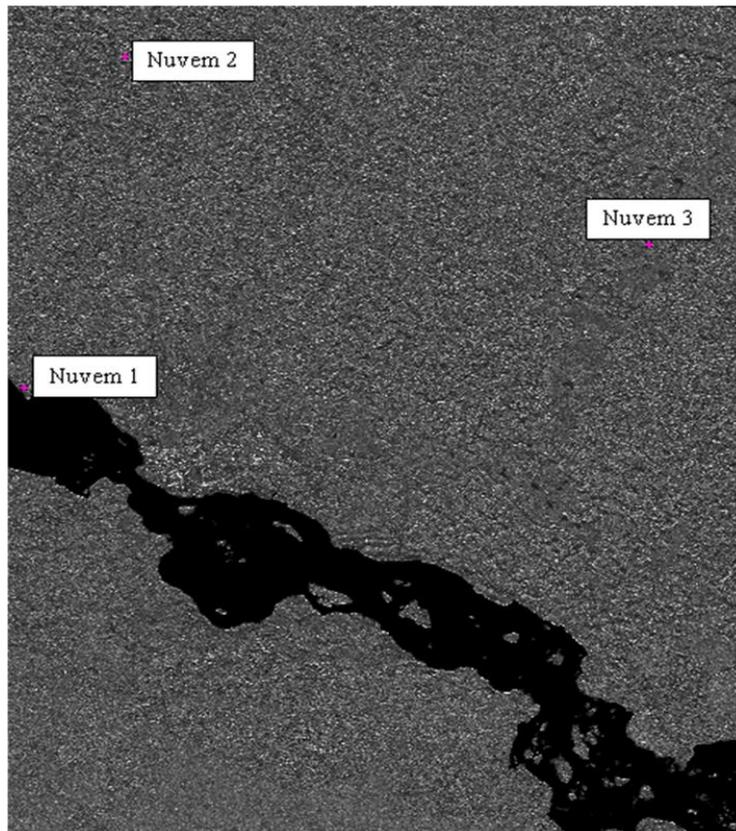
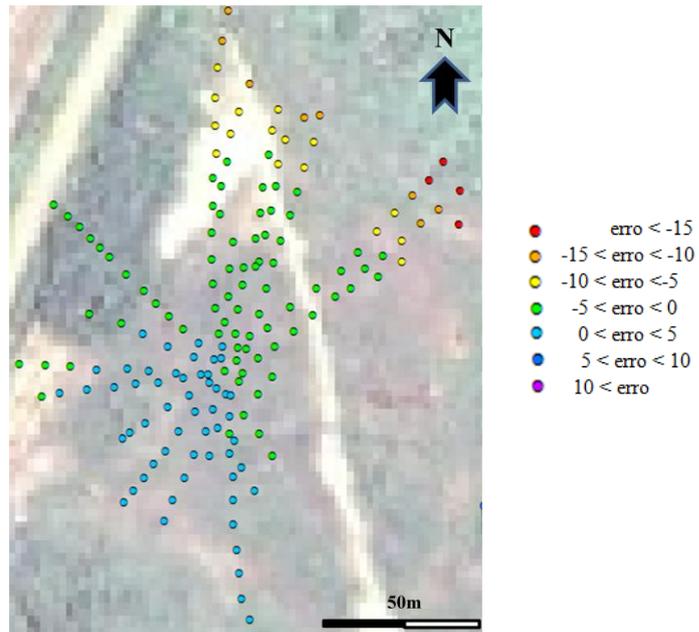
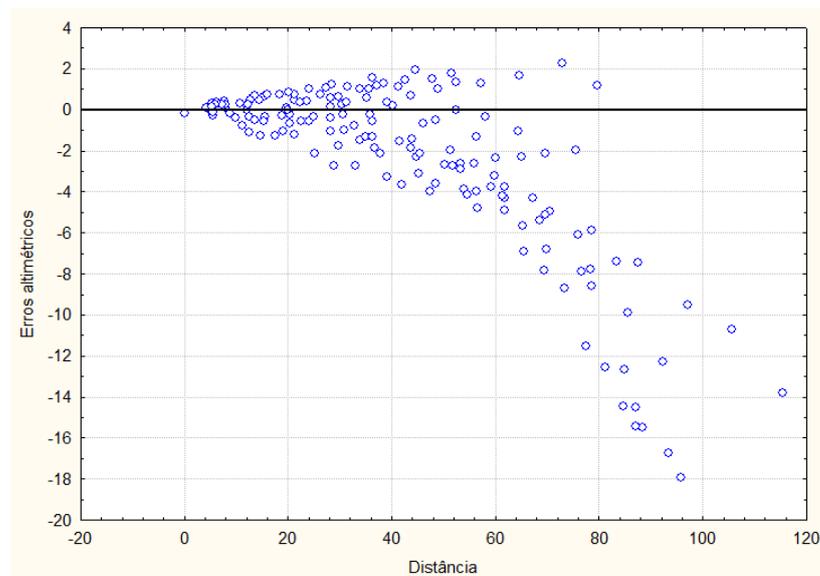


Figura 5.5 – Localização das 3 nuvens de pontos sobre a ortoimagem na banda X.

Nas Figuras 5.6 a 5.8 são apresentadas, para cada nuvem de pontos a disposição dos pontos medidos em campo com a legenda dos intervalos dos erros altimétricos, e o respectivo gráfico dos erros altimétricos *versus* distância do ponto à Estação Total.

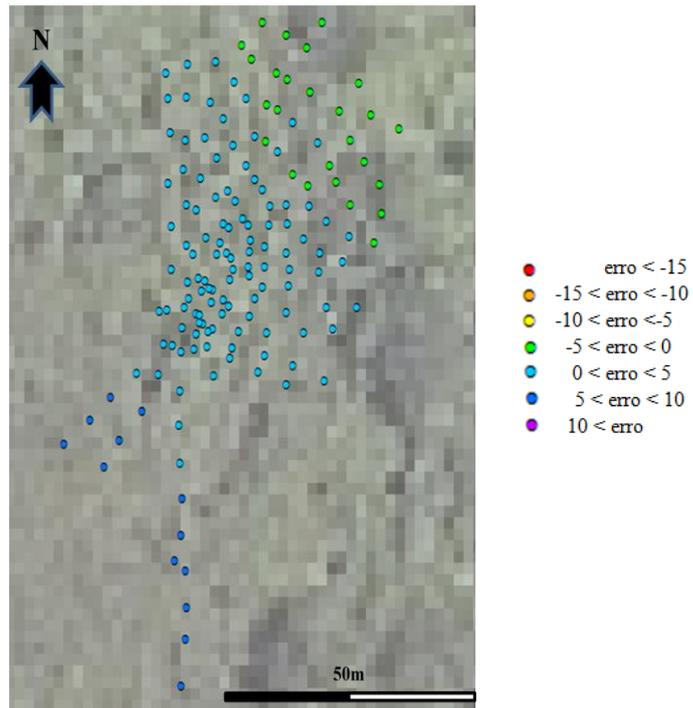


(a)

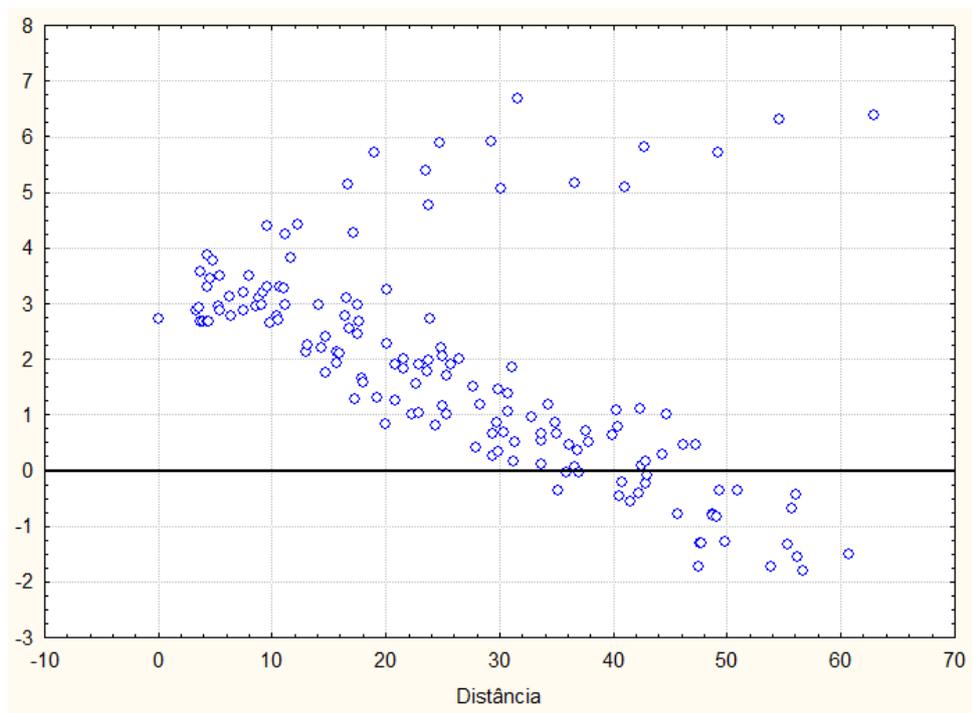


(b)

Figura 5.6 – Nuvem 3: (a) localização dos pontos medidos, e (b) Gráfico dos erros altimétricos (m) *versus* distância do ponto à Estação Total (m).

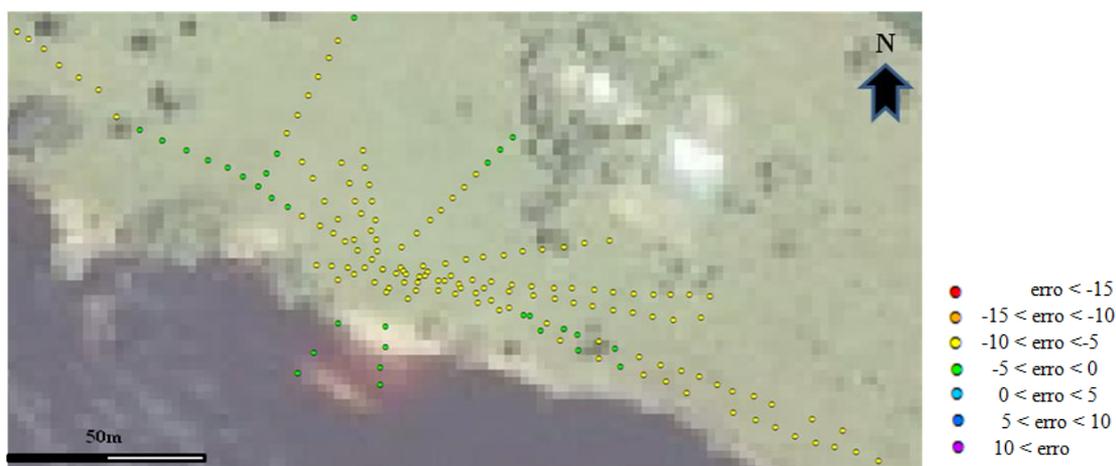


(a)

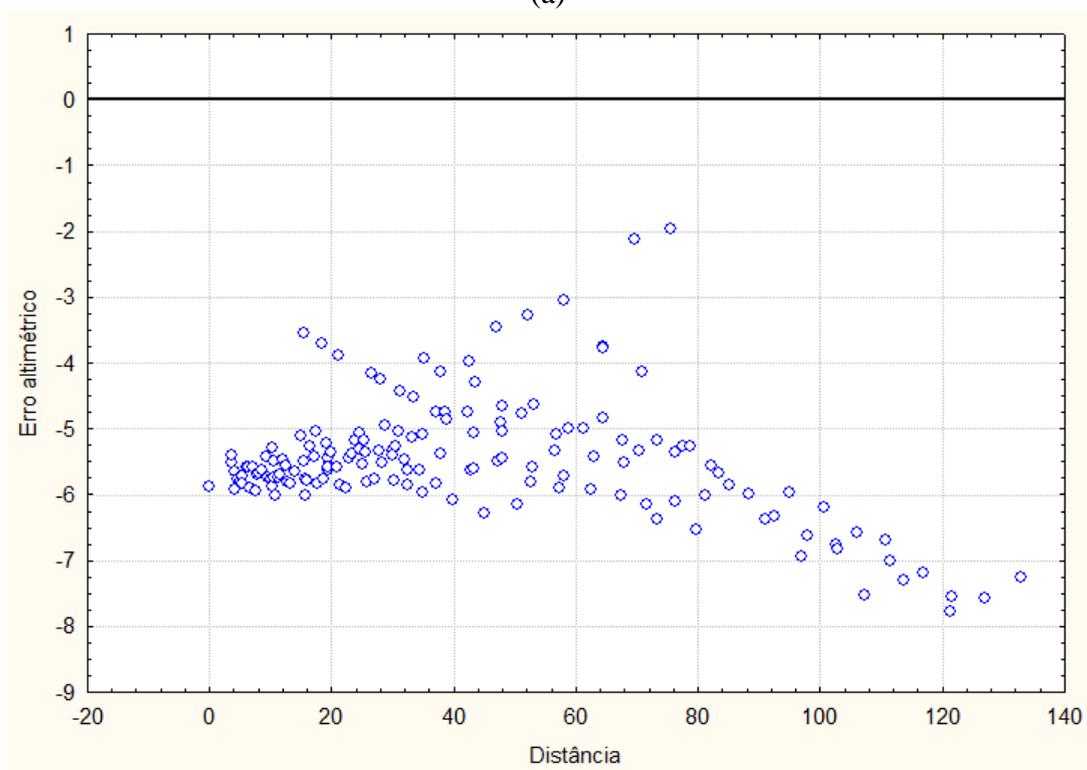


(b)

Figura 5.7 – Nuvem 2: (a) localização dos pontos medidos, e (b) Gráfico dos erros altimétricos (m) *versus* distância do ponto à Estação Total (m).



(a)



(b)

Figura 5.8 – Nuvem 1: (a) localização dos pontos medidos, e (b) Gráfico dos erros altimétricos (m) *versus* distância do ponto à Estação Total (m).

Na Tabela 5.3 encontra-se a estatística descritiva de cada nuvem e o estrato ao qual pertence. Percebe-se da Tabela 5.3 e das Figuras 5.6 a 5.8 que, para as nuvens de pontos 1 (OnPa) e 3 (PISe), houve uma tendência do MDT em subestimar a altimetria conforme as medições dos pontos se deslocavam para o Norte, ocorrendo o oposto no sentido Sul. Os

erros dos pontos medidos em cada um desses sentidos, coincidentes com o sentido *across-track* do imageamento, aumentavam quanto maior eram as distâncias à Estação Total, sendo esse fenômeno maior para a Nuvem 3. Essa nuvem (PISe) apresentou ainda a maior amplitude de erros (20,24 m) e desvio padrão (4,22 m), permitindo a partir da média global concluir que subestima as observações. À margem esquerda do rio Negro, a Nuvem 1 (OnPa) subestimou todas as observações, apresentando ainda o menor desvio padrão (0,82 m) e amplitude de erros (4,73 m), e a maior média (-5,50 m). Não fica evidente a variação mencionada no sentido Norte-Sul, talvez por essa nuvem se desenvolver na direção Leste-Oeste (*along-track*). A Nuvem 2 (PIFl), que corresponde a uma região que à época do imageamento ainda tinha cobertura *Florestal*, foi a que apresentou média positiva e valores de desvio padrões intermediários em relação às outras nuvens.

Tabela 5.3 – Estatística descritiva das nuvens de pontos.

Nuvem	N	Estrato	Mínimo (m)	Máximo (m)	(Máximo – Mínimo) (m)	Média (m)	DP (m)
1	158	OnPa	-7,78	-3,05	4,73	-5,50	0,82
2	153	PIFl	-1,81	6,68	8,49	1,83	1,89
3	160	PISe	-17,95	2,29	20,24	-2,39	4,22
<b>Todos</b>	471		-17,95	6,68		-2,06	4,05

Pode-se vir a pensar que os erros verificados fossem devidos a uma possível descalibração do mecanismo de visada e de medição de distâncias da Estação Total. Entretanto, nesse caso os erros esperados teriam disposição radial o que não ocorre. Buscou-se minimizar alguns problemas associados aos levantamentos topográficos, como por exemplo, os erros associados a distintos operadores executarem parte de uma mesma tarefa. Essa hipótese deve ser descartada, pois um mesmo profissional executou todas as medidas para uma dada nuvem. Cada nuvem foi também totalmente levantada numa mesma data e suas medidas se deram entre 8 hs e 10 hs. Com isso, buscava-se trabalhar com luz solar moderada e evitar o efeito da reverberação do ar, que dificulta e até mesmo impossibilita a leitura da mira. Ressalta-se ainda que as miras tiveram suas alturas ajustadas entre 0,50 cm e 1 m do chão, a fim de evitar as visadas rasantes.

Do exposto, essa análise exploratória leva a concluir que, tais discrepâncias e comportamento dificilmente são atribuídas aos operadores e equipamentos, mas sim ao MDT. Ficaram mais evidentes as discrepâncias na direção Norte-Sul (*across-track*) e com aumento da subestimação no sentido para o Norte. Por outro lado, na direção Leste-Oeste (*along-track*) não foi possível verificar uma variação proporcional dos erros com a distância.

### 5.3.2 Pontos para Avaliação Altimétrica por Estratos

Os 1047 pontos coletados para a análise altimétrica mais detalhada estão apresentados na Figura 5.9 e foram distribuídos nos estratos conforme mostrado na Tabela 5.4. Nota-se, desta tabela, a existência de no mínimo 30 pontos medidos em cada estrato. Valor este que foi previamente definido antes do trabalho de campo, com o qual se objetivava conseguir um número suficiente de amostras para se realizar uma adequada análise estatística.

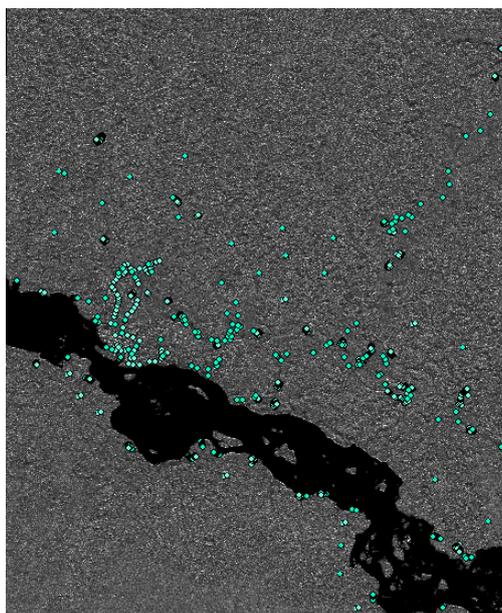


Figura 5.9 - Localização dos 1047 pontos para a análise altimétrica sobre a ortofotomontagem nabanda X.

Tabela 5.4 – Número de pontos medidos em campo para a análise altimétrica.

	<i>Plano</i>	<i>Ondulado</i>	<i>Montanhoso</i>	<i>Total</i>
<i>Solo Exposto</i>	100	40	33	173
<i>Pastagem</i>	104	58	46	208
<i>Regeneração</i>	77	57	45	179
<i>Floresta</i>	138	73	36	247
<i>Área Urbana</i>	54	186	0	240
<i>Total</i>	473	414	160	1047

Na Tabela 5.5 são apresentados, para cada estrato, os valores médios das altitudes medidas em campo e as obtidas pelo modelo digital da banda P (MDT), assim como, entre parênteses, os seus respectivos desvios padrões. A Figura 5.10 apresenta o gráfico correspondente às estas medidas.

Tabela 5.5 – Valores médios e desvios padrões das altitudes medidas em campo (GPS) e obtidas do MDT da banda P.

		<i>Plano</i>	<i>Ondulado</i>	<i>Montanhoso</i>	<i>Total</i>
<i>Solo Exposto</i>	<b>GPS</b>	83,52 (6,69)	82,45 (3,62)	83,76 (3,00)	83,32 (5,53)
	<b>MDT</b>	80,71 (6,92)	78,04 (4,38)	76,71 (3,13)	79,33 (6,05)
<i>Pastagem</i>	<b>GPS</b>	77,47 (7,65)	76,34 (5,00)	79,20 (6,72)	77,54 (6,84)
	<b>MDT</b>	74,46 (7,79)	74,01 (5,16)	75,75 (4,77)	74,62 (6,55)
<i>Regeneração</i>	<b>GPS</b>	74,06 (3,20)	75,33 (8,94)	79,29 (12,01)	75,78 (8,35)
	<b>MDT</b>	74,21 (3,36)	76,64 (7,83)	83,11 (13,90)	77,22 (9,20)
<i>Floresta</i>	<b>GPS</b>	75,07 (10,97)	85,41 (24,62)	82,86 (30,37)	79,26 (19,97)
	<b>MDT</b>	77,27 (11,77)	89,45 (25,87)	90,24 (28,14)	82,76 (20,59)
<i>Área Urbana</i>	<b>GPS</b>	78,91 (5,36)	67,13 (5,69)	-	69,78 (7,47)
	<b>MDT</b>	76,67 (5,22)	64,79 (5,82)	-	67,47 (7,55)
<i>Total</i>	<b>GPS</b>	77,66 (8,57)	74,25 (13,71)	80,99 (16,18)	76,82 (12,36)
	<b>MDT</b>	76,81 (8,60)	73,34 (15,10)	81,28 (16,39)	76,12 (13,10)

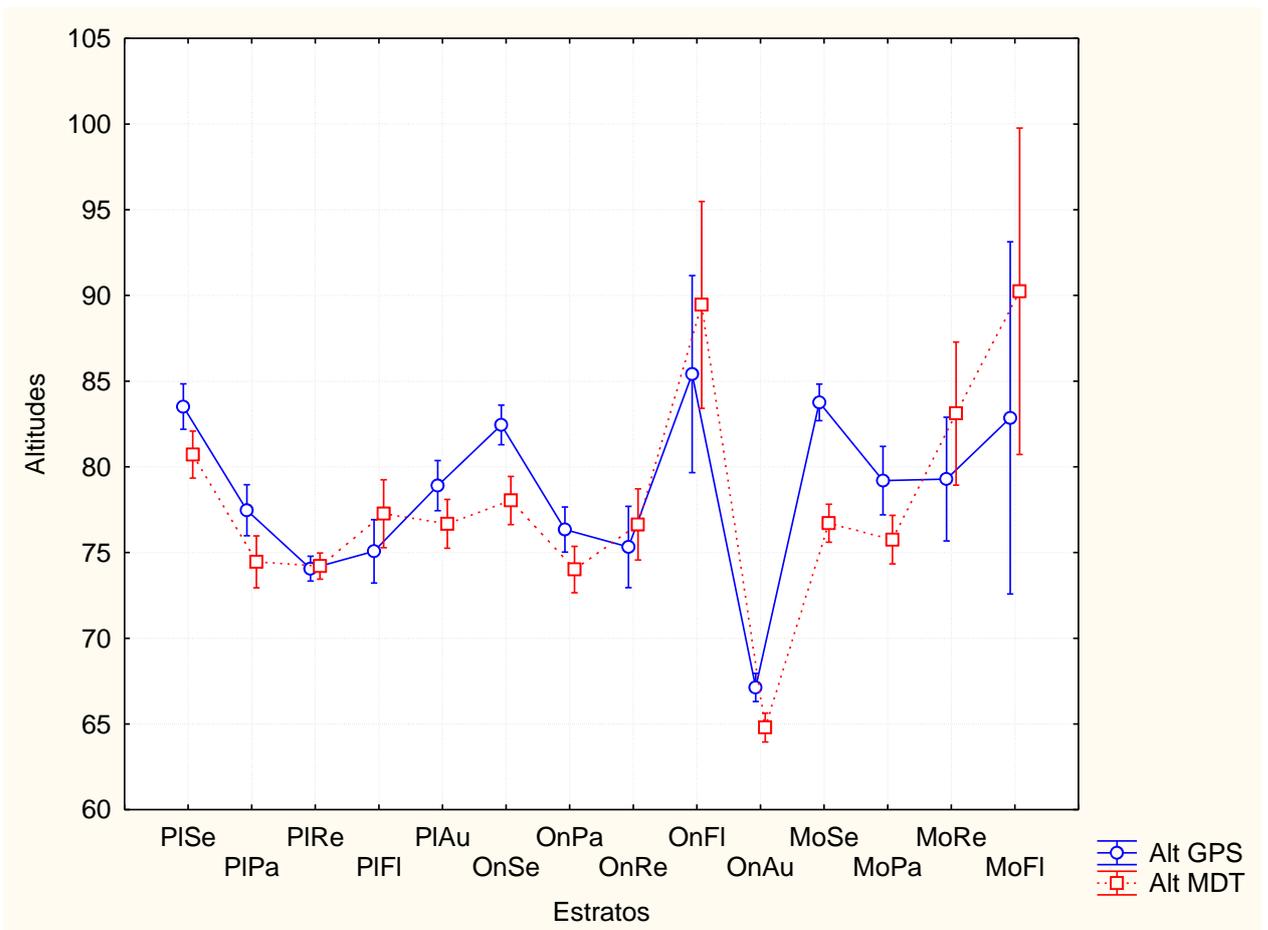


Figura 5.10 - Altitudes medidas em campo e extraídas do MDT da banda P para cada estrato, com os respectivos intervalos com 95% de confiança.

Pode-se observar que os valores médios e os desvios padrões obtidas do MDT e do GPS são bastante similares. Fica evidente também que as maiores variâncias ocorrem para a classe *Floresta* nos gradientes de declividade *Ondulado* e *Montanhoso*, e para *Regeneração* no gradiente de declividade *Montanhoso*. Para uma mesma classe de gradiente de declividade, a classe *Floresta* é a que apresenta a maior variância.

Observa-se também que, independente da declividade do terreno, o MDT tende a superestimar as altitudes nas classes *Regeneração* e *Floresta*, enquanto para as demais classes tende a uma subestimação das altitudes. Por outro lado, os desvios padrões das duas medidas de altitude (GPS e MDT) são similares, indicando que a variabilidade das altitudes do modelo é representativa da variabilidade natural das altitudes do terreno.

O diagrama de dispersão das altitudes obtidas do GPS e do MDT é apresentada na Figura 5.11. As linhas retas nesta figura representam os valores em que o MDT e os dados de campo coincidem (linha preta) e a reta de regressão estimada através das altitudes do GPS e do MDT (linha vermelha). A Tabela 5.6 apresenta os valores dos coeficientes de regressão, seus desvios padrões e respectivos valores-*p*. Pode-se verificar que o intercepto é estatisticamente igual a zero ao nível de significância de 5%. O teste de hipótese, baseado nos intervalos de confiança de Bonferroni, de que, conjuntamente, o intercepto desta reta é igual a zero e que o coeficiente angular é igual a 1 é aceito ao nível de significância de 5%. Portanto, pode-se afirmar que, de maneira geral, as altitudes do modelo digital da banda P representam bem as altitudes reais do terreno. Entretanto, observa-se também que existe uma tendência do MDT a superestimar as altitudes reais para altitudes superiores a aproximadamente 110 m. Uma análise mais detalhada sobre os estratos que influenciam esses erros é efetuada na seção 5.7.

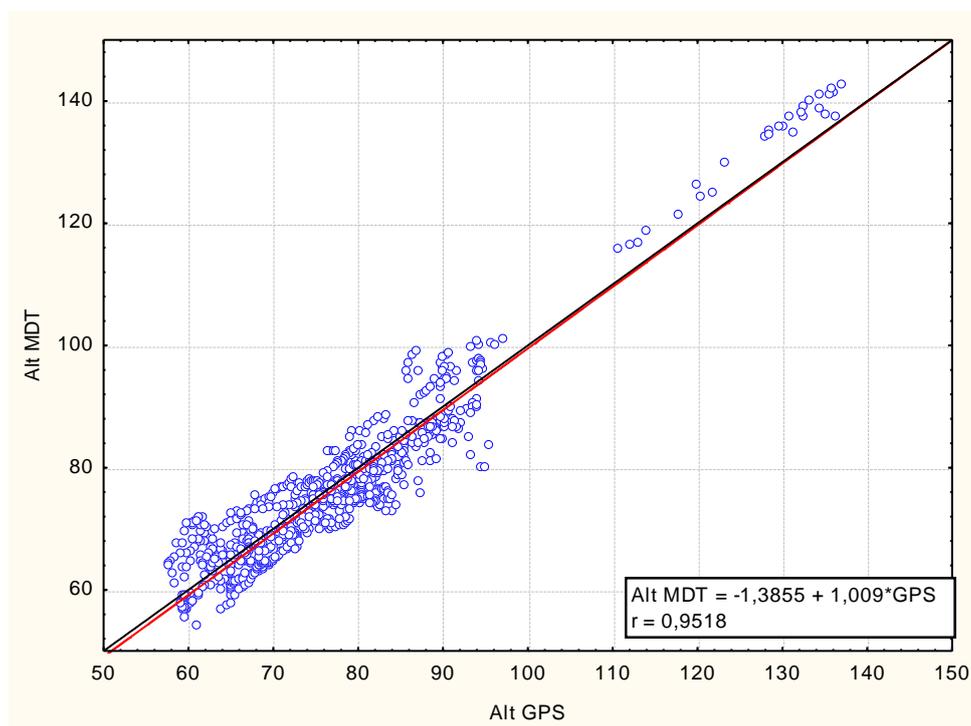


Figura 5.11 – Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS, reta de regressão estimada e o coeficiente de correlação.

Tabela 5.6. Resultados da regressão linear das altitudes do MDT e do GPS.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>t</i> (1045)	<i>p</i>
<b>Intercepto</b>	-1,386	0,783	-1,77	0,08
<b>Inclinação</b>	1,009	0,010	100,3	<0,0001

A Figura 5.12 apresenta o histograma dos erros altimétricos e o resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilks, considerando as 1047 observações.

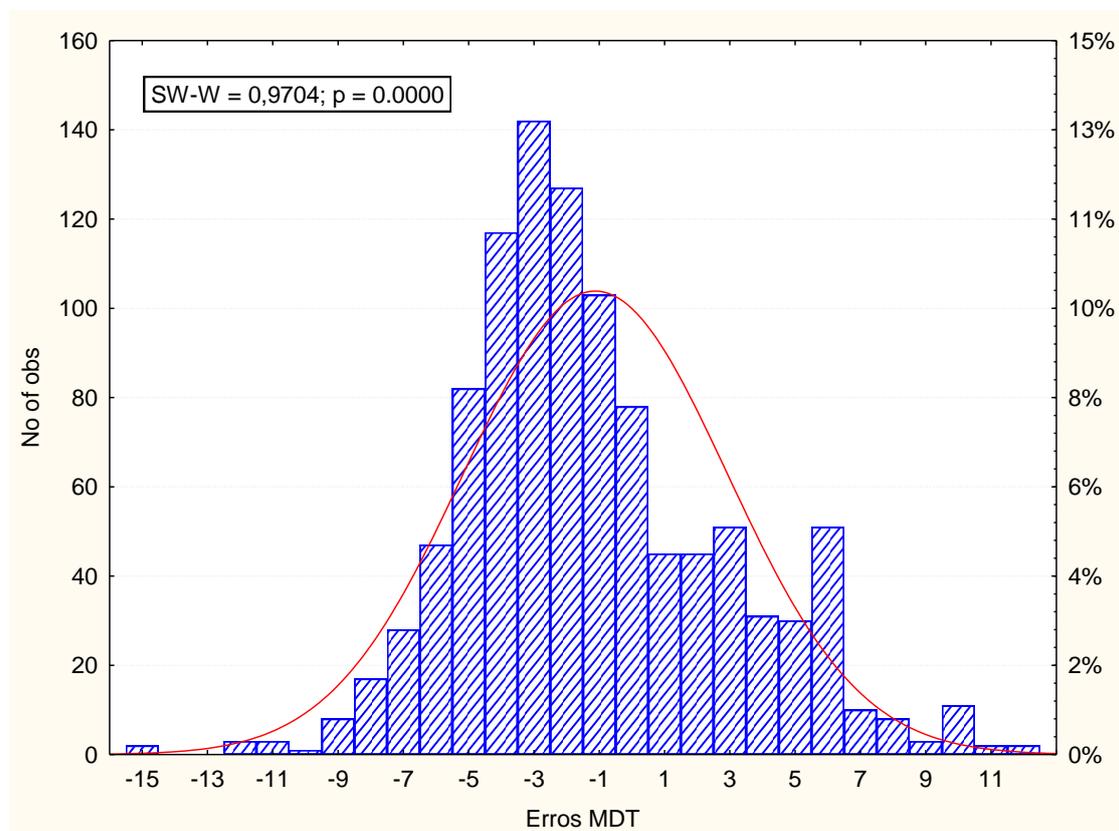


Figura 5.12 – Histograma dos erros altimétricos com resultado do teste Shapiro-Wilks.

Observa-se que não se pode considerar que os erros altimétricos apresentem uma distribuição gaussiana (linha vermelha), uma vez que o valor-*p* é aproximadamente igual a zero. Apesar disto, as análises de tendência e exatidão, assim como as avaliações

cartográficas segundo os padrões PEC e NSSDA foram efetuadas, uma vez que o número de observações é razoavelmente grande.

#### 5.4 Análise de Tendência e Precisão

Os resultados obtidos na análise de tendência são apresentados na Tabela 5.7. A hipótese nula de que a média dos erros altimétricos é igual a zero é rejeitada a qualquer nível de significância prático ( $\text{valor-}p < 0,0001$ ). Portanto, pode-se afirmar que o MDT não pode ser considerado livre de tendências significativas.

Para a análise de precisão, proposta por Galo e Camargo (1994), em que a hipótese nula de que o desvio padrão dos erros altimétricos é menor ou igual ao desvio padrão esperado para a classe desejada (denominado no PEC por erro padrão), as estatísticas  $\chi^2$ , calculadas segundo a equação 2.21, são apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Estatística descritiva e resultado da análise de tendência do MDT.

	<b>Erros MDT (<math>\epsilon</math>)</b>
<b>Média (m)</b>	-0,696
<b>Desvio Padrão (m)</b>	4,02
<b>t amostral</b>	-5,60
<b>t (1046, 5%)</b>	1,96
<b>Valor-p</b>	< 0,0001

Tabela 5.8–Resultado dos testes  $\chi^2$  para a análise de precisão do MDT.

	<b>Escalas</b>		
	<b>1:10.000</b>	<b>1:25.000</b>	<b>1:50.000</b>
<b><math>\chi^2</math> classe A (valor-p)</b>	6061,09 (< 0,001)	1524,39 (< 0,001)	381,10 ( $\approx 1,0$ )
<b><math>\chi^2</math> classe B (valor-p)</b>	4225,95 (< 0,001)	1056,49 (0,40)	264,12 ( $\approx 1,0$ )
<b><math>\chi^2</math> classe C (valor-p)</b>	2704,61 (< 0,001)	676,15 ( $\approx 1,0$ )	169,04 ( $\approx 1,0$ )
<b><math>\chi^2</math> (1046, 5%)</b>	1122,35		

Ao se considerar que não existe tendência nos dados observados e que os mesmos são normalmente distribuídos, verifica-se pela Tabela 5.8 que, ao nível de significância de 5%, o padrão cartográfico de classe A somente seria atendido para a escala de 1:50.000, enquanto que para as classes B e C, o padrão cartográfico seria atendido na escala 1:25.000.

### **5.5 Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira**

Pelas normas técnicas da cartografia brasileira (item 2., Art 8º do Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984), é necessário que pelo menos 90% dos pontos altimétricos (943 pontos) não apresentem erro superior ao PEC altimétrico estabelecido. Para os dados analisados, verificou-se que 90% dos erros altimétricos foram inferiores a 6,5 m. Portanto, segundo a Tabela 2.5, o MDT da banda P atenderia aos padrões cartográficos das classes A e B na escala 1:50.000 e da classe C na escala 1:25.000.

### **5.6 Avaliação Cartográfica sob as Normas Técnicas do NSSDA**

Para se determinar a acurácia vertical absoluta, foi determinado o valor do RMSE. Os erros oriundos do MDT apresentaram RMSE de 4,079 m, podendo-se afirmar ao final da avaliação que o MDT possui um conjunto de dados que apresentam 7,99 m ( $1,96 \times \text{RMSE}$ ) de acurácia vertical absoluta a 95% de nível de confiança.

### **5.7 Análise por Estratos**

Nesta seção é efetuada a análise dos dados altimétricos e dos erros do MDT, relacionando-os com as classes de gradiente de declividade e de uso e ocupação do solo, definidas na seção 3.3.2 desta dissertação, e dos estratos formados pela interseção dessas classes.

### 5.7.1 Classes de Gradiente de Declividade

Pode-se observar pela Tabela 5.5 que os valores médios e dos desvios padrões das altitudes do GPS e do MDT para as diferentes classes de gradiente de declividade são muito similares. A Tabela 5.9 apresenta as principais estatísticas (número de observações, valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão, desvio padrão da média, e o RMSE) para os erros do MDT, para cada classe de gradiente de declividade. Nota-se, que os desvios padrões das altitudes e dos erros do MDT são maiores para a classe com maiores gradientes de declividade (Montanhoso). Os testes de hipóteses para a análise de tendência, i.e, para determinar se a média dos erros é estatisticamente igual a zero (teste *t*-Student) indicam uma tendência do modelo subestimar ( $p < 0,001$ ) as verdadeiras altitudes para os gradientes *Plano* (em 0,84 m) e *Ondulado* (em 0,91 m), mas não há evidências para rejeitar a hipótese de média zero para a classe de gradiente *Montanhoso* ( $p = 0,57$ ).

Tabela 5.9. Estatísticas descritivas para os erros do modelo digital da banda P, segundo as classes de gradiente de declividade.

<i>Declividade</i>	N	Mínimo (m)	Máximo (m)	Média (m)	DP (m)	DPmédia (m)	RMSE (m)
<i>Plano</i>	473	-11,65	8,17	-0,84	3,28	0,15	3,39
<i>Ondulado</i>	414	-8,72	7,61	-0,91	3,44	0,17	3,56
<i>Montanhoso</i>	160	-14,52	12,5	0,29	6,52	0,52	6,53
<i>Todos</i>	1047	-14,52	12,5	-0,696	4,02	0,12	4,08

A Figura 5.13 apresenta o gráfico das altitudes do MDT em relação às altitudes medidas em campo, destacando-se as classes de gradiente de declividade (*Plano*, *Ondulado* e *Montanhoso*) a que cada ponto pertence. A linha reta nesta figura representa os valores em que o MDT e os dados de campo coincidem. Pode-se observar que as maiores altitudes estão localizadas nas classes de gradientes *Ondulado* e *Montanhoso*, e que o modelo digital da banda P tende a superestimar esses valores. Este fato pode também ser observado pelo gráfico dos erros do modelo contra as verdadeiras altitudes (Figura 5.14). Note também que

os erros de subestimação ( $\varepsilon < -10$  m) ocorrem para as classes de declividade *Plano* (4 pontos, correspondendo a 0,8% dos dados desta classe) e *Montanhoso* (4 pontos, 2,5%), enquanto que os maiores erros de superestimação ( $\varepsilon > 10$  m) ocorrem para a classe de declividade *Montanhoso* (15 pontos, 9,4%).

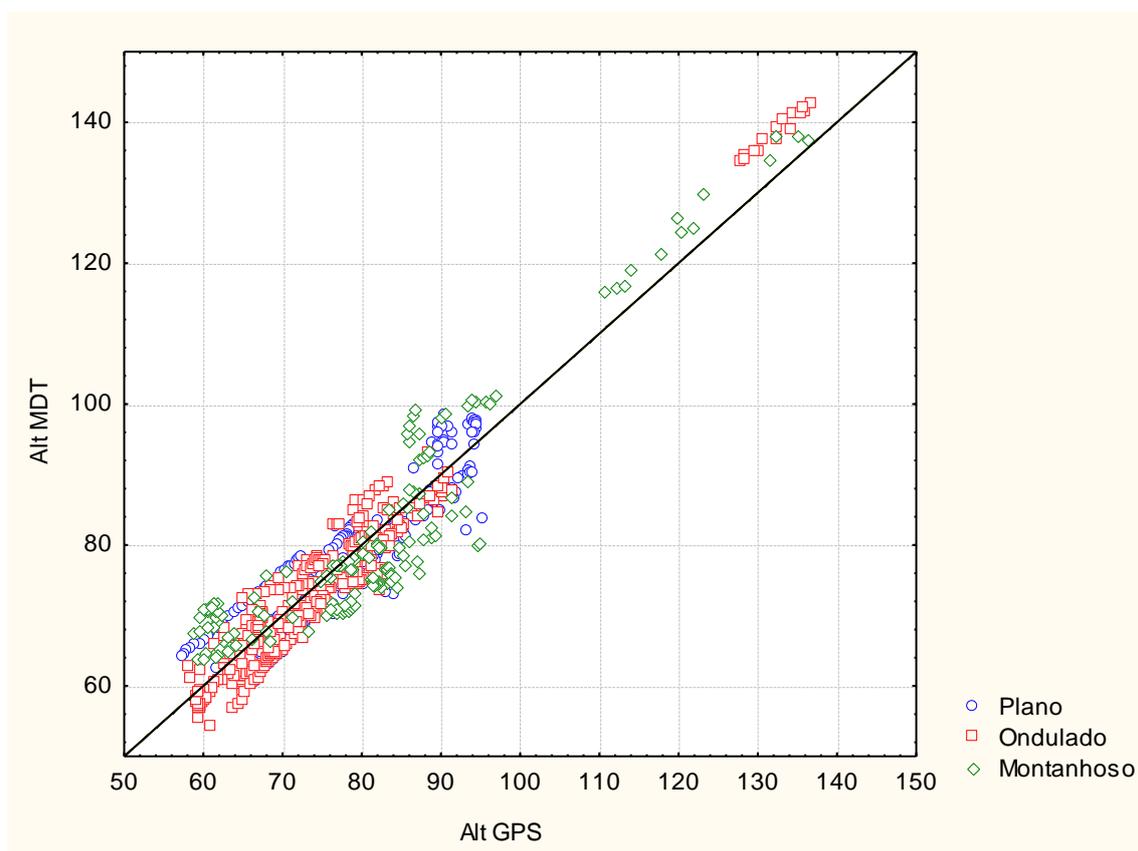


Figura 5.13 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS, para as diferentes classes de gradiente de declividade.

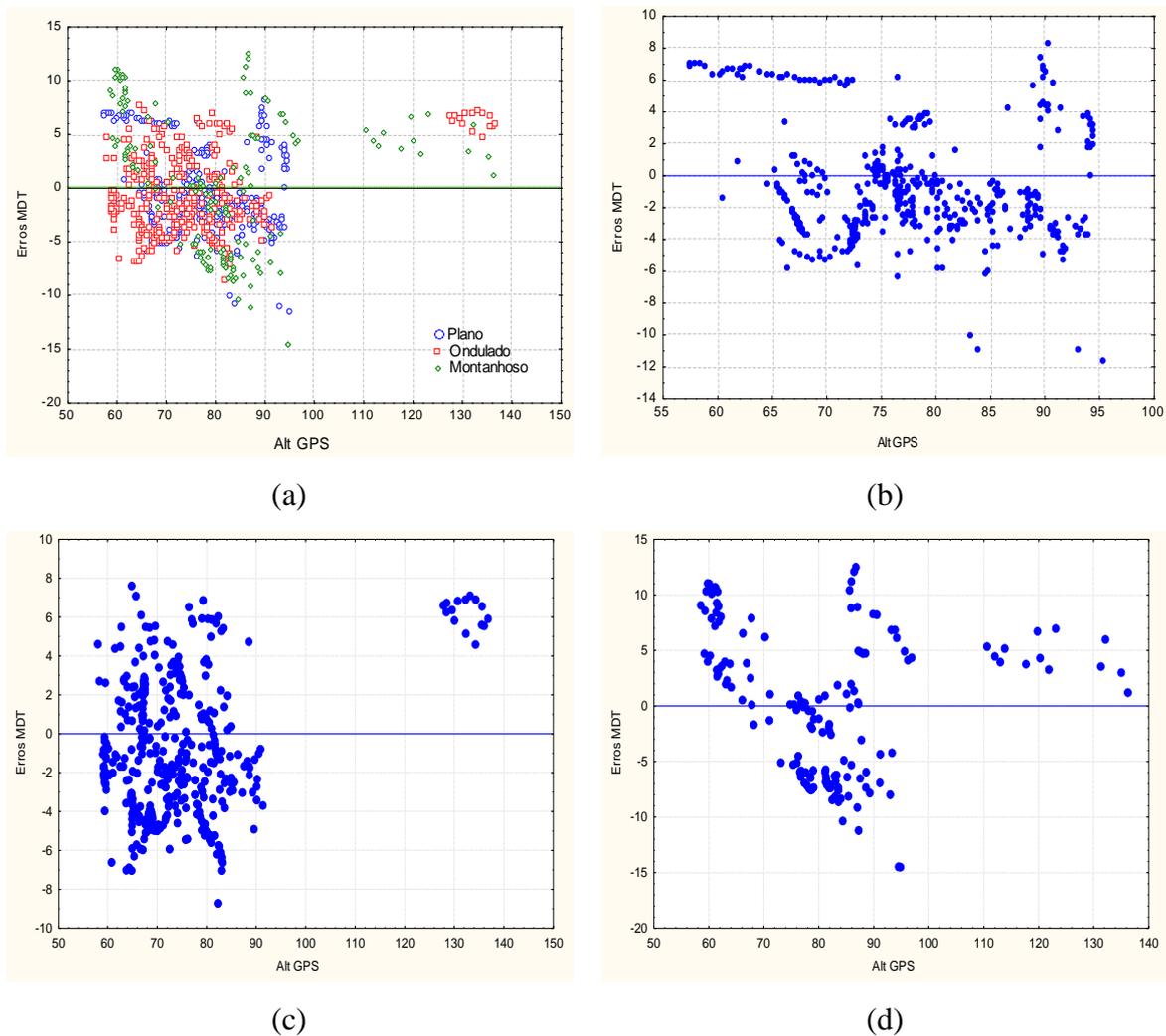


Figura 5.14 - Diagrama de dispersão dos erros do MDT em função da altitude obtida com GPS, para (a) todas as amostras, e para as amostras das classes de gradiente de declividade (b) *Plano*, (c) *Ondulado* e (d) *Montanhoso*.

O *Box-Plot* dos erros (Figura 5.15) evidencia a maior variância dos erros para a classe *Montanhoso*, o que influenciará a medida de acurácia do produto cartográfico em análise, bem como no seu enquadramento de acordo com o PEC. Pode ser observado, ainda, que em média as altitudes do MDT nas classes *Plano* e *Ondulado* tendem a ser subestimadas, enquanto na classe *Montanhoso* estas altitudes são superestimadas.

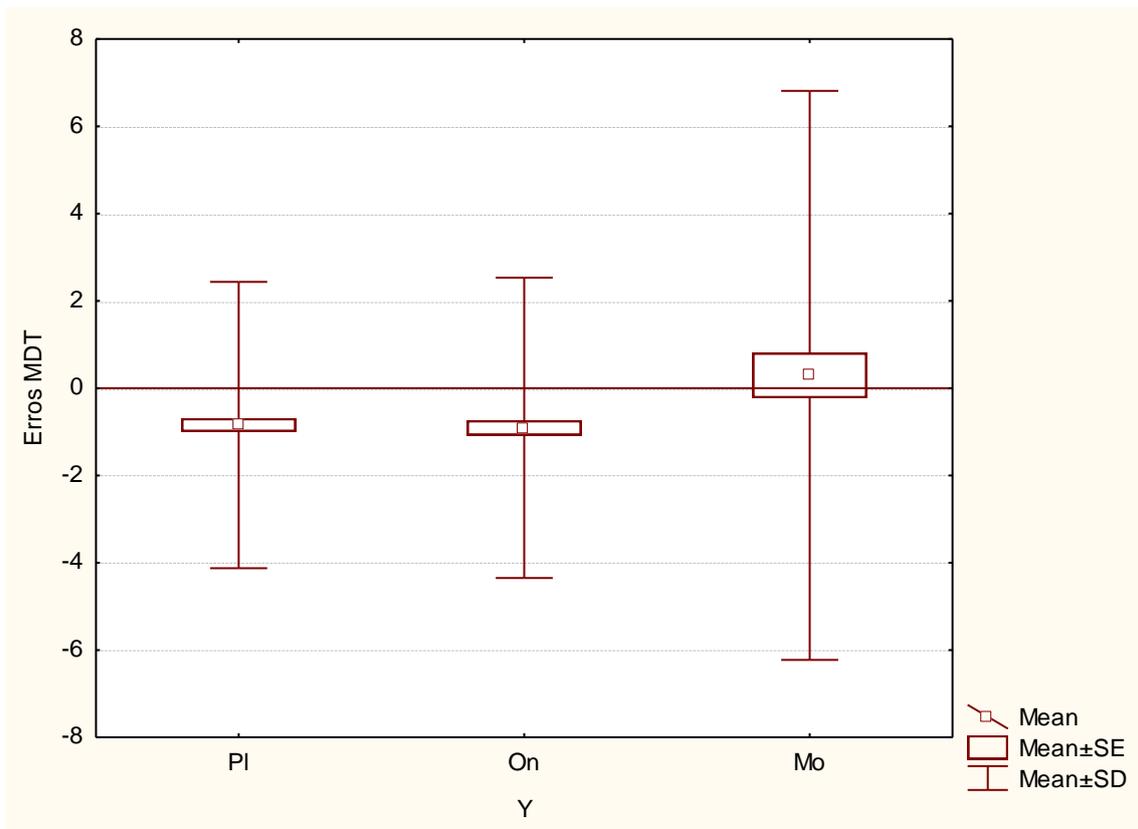


Figura 5.15 - *Box-Plot* dos erros do MDT para os diferentes gradientes de declividade.

Pelos histogramas apresentados na Figura 5.16 pode-se observar a não normalidade dos erros. O teste de Shapiro-Wilks aplicado apresentou por resultados valores- $p$  menores que 0,0001, para cada classe de gradiente de declividade.

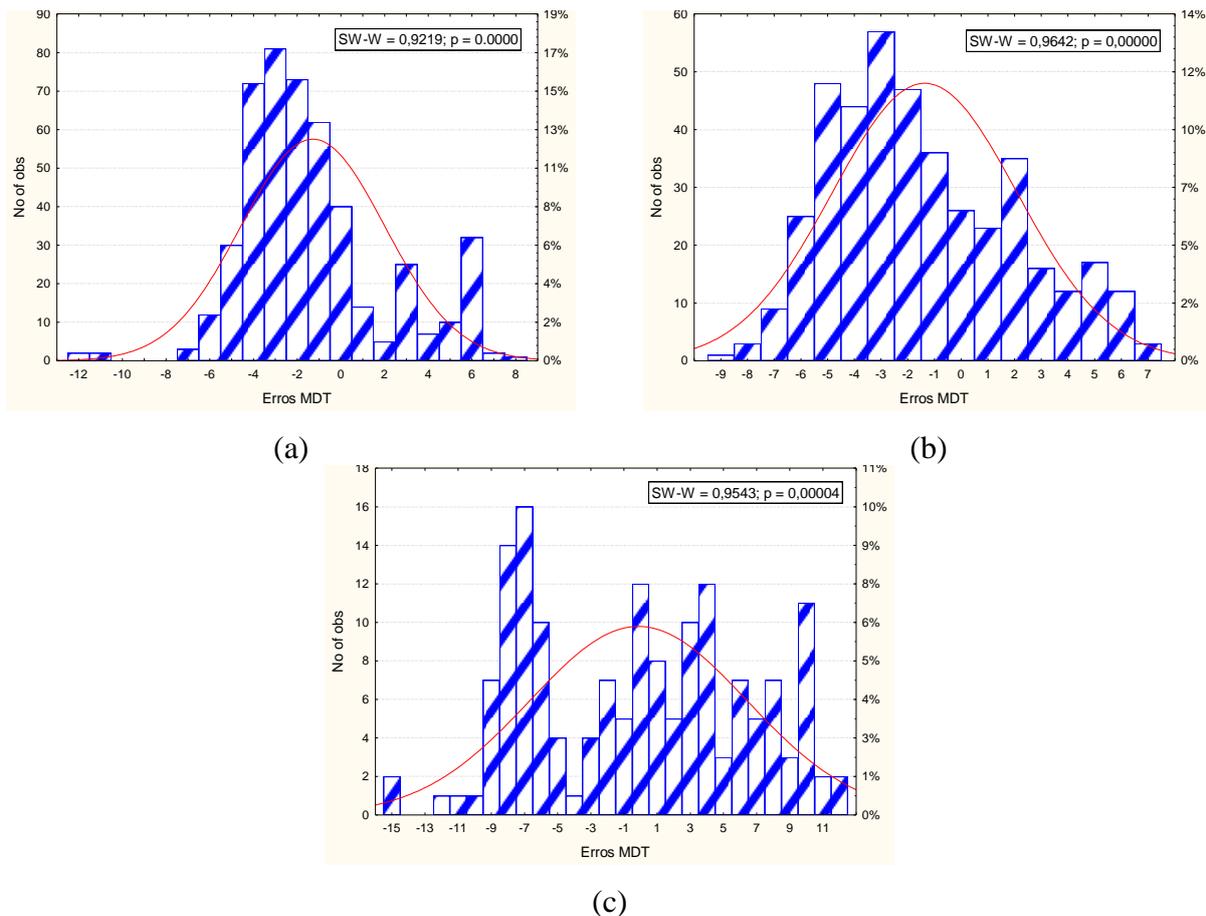


Figura 5.16 - Histograma dos erros do modelo digital da banda P para as classes de gradientes de declividade: (a) *Plano*, (b) *Ondulado* e (c) *Montanhoso*.

A partir dos valores dos desvios padrões dos erros, foram calculados, segundo a análise de exatidão de Galo e Camargo (1994), os valores do PEC mínimo (Equação 2.28) os quais são apresentados na segunda coluna da Tabela 5.10. Estes valores de PEC mínimo, ignorando a tendência dos dados, foram utilizados no enquadramento do MDT nos padrões cartográficos, de acordo com a Tabela 2.5. As escalas/classes correspondentes para cada classe de gradiente de declividade são apresentadas nas colunas 3 a 5 da Tabela 5.10. Verifica-se que as regiões com menores gradientes de declividade (*Plano* e *Ondulado*) estão enquadradas nos padrões da classe A, na escala 1:50.000, ou das classes B e C na escala 1:25.000, apesar da tendência encontrada. Entretanto, as regiões com maiores gradientes de declividade (*Montanhoso*), pelo fato dos erros possuírem alta variabilidade e não serem normalmente distribuídos, enquadram-se na escala 1:50.000 para todas as classes.

Tabela 5.10. Enquadramento nos padrões cartográficos segundo as classes de gradiente de declividade.

Classes de Gradiente de Declividade	Galo e Camargo (1994) - sem considerar tendência			PEC			NSSDA		
	PEC mínimo (Eq 2.28) (m)	Classe A	Classe B	Classe C	$ \varepsilon _{90\%}$ (m)	Classe A	Classe B	Classe C	Acurácia $1,96 \cdot \text{RMSE}$ (m)
<i>Plano</i>	4,67	1:50000	1:25000	1:25000	5,8	1:50000	1:25000	1:25000	6,64
<i>Ondulado</i>	4,88	1:50000	1:25000	1:25000	5,7	1:50000	1:25000	1:25000	6,97
<i>Montanhoso</i>	8,96	1:50000	1:50000	1:50000	10,3	1:100000	1:50000	1:50000	12,79
<b>Todos</b>	5,82	1:50000	1:25000	1:25000	6,5	1:50000	1:50000	1:25000	8,00

Através da análise dos dados verificou-se que 90% dos erros altimétricos foram inferiores aos valores apresentados na coluna 6 da Tabela 5.10. Comparando-se estes valores com os estabelecidos pelo PEC (Tabela 2.5), chega-se ao mesmo enquadramento da análise proveniente de Galo e Camargo (1994) para as regiões com menores gradientes de declividade (*Plano* e *Ondulado*). Entretanto, as regiões com maiores gradientes de declividade (*Montanhoso*) seriam enquadradas na classe A somente na escala 1:100.000, e na classe B na escala 1:50.000. A última coluna da Tabela 5.10 fornece, em metros, a acurácia segundo o NSSDA.

### 5.7.2 Classes de Uso e Ocupação do Solo

A Tabela 5.11 apresenta os números de pontos, valores mínimos e máximos, médias, desvios padrões dos dados e das médias e o RMSE, para os pontos pertencentes às diferentes classes de uso e ocupação do solo.

Tabela 5.11. Estatísticas descritivas para os erros do MDT, segundo as classes de uso e ocupação do solo.

Uso do Solo	N	Mínimo (m)	Máximo (m)	Média (m)	DP (m)	DPmédia (m)	RMSE (m)
<i>Solo Exposto</i>	173	-10,95	0,19	-3,98	2,31	0,18	4,60
<i>Área Urbana</i>	240	-7,04	2,91	-2,31	2,14	0,14	3,15
<i>Pastagem</i>	208	-14,52	7,88	-2,92	2,78	0,19	4,03
<i>Regeneração</i>	179	-1,81	12,50	1,44	2,68	0,20	3,04
<i>Floresta</i>	247	-3,73	11,01	3,50	3,69	0,23	5,08
<b>Todos</b>	1047	-14,52	12,5	-0,696	4,02	0,12	4,08

As médias dos erros dos modelos para todos os tipos de uso e ocupação do solo são estatisticamente diferentes de zero (valor- $p < 0,001$ ). Pode-se observar que o modelo possui uma tendência a subestimar as altitudes nas classes *Solo Exposto*, *Pastagem* e *Área Urbana*, e uma tendência a superestimar as altitudes nas classes *Regeneração* e *Floresta*. Apesar disto ser de certa maneira esperado, uma vez que a onda eletromagnética na banda P pode, teoricamente, penetrar no solo, e, para o caso de *Floresta* e *Regeneração* retornar antes de atingir o solo, os valores de tendência são razoavelmente altos, principalmente para as classes *Solo Exposto* e *Pastagem* (erros médios de aproximadamente 3 a 4 metros).

As Figuras 5.17 a 5.19 apresentam, respectivamente, os diagramas de dispersão das altitudes do MDT e de seus erros contra as altitudes medidas em campo, e o *Box-Plot* dos erros. Nota-se claramente por estas figuras a tendência do MDT a subestimar as altitudes para as classes de uso de solo com pouca ou nenhuma vegetação, enquanto que o inverso ocorre para as áreas com vegetação. Na classe *Floresta* os erros altimétricos apresentam a maior variância.

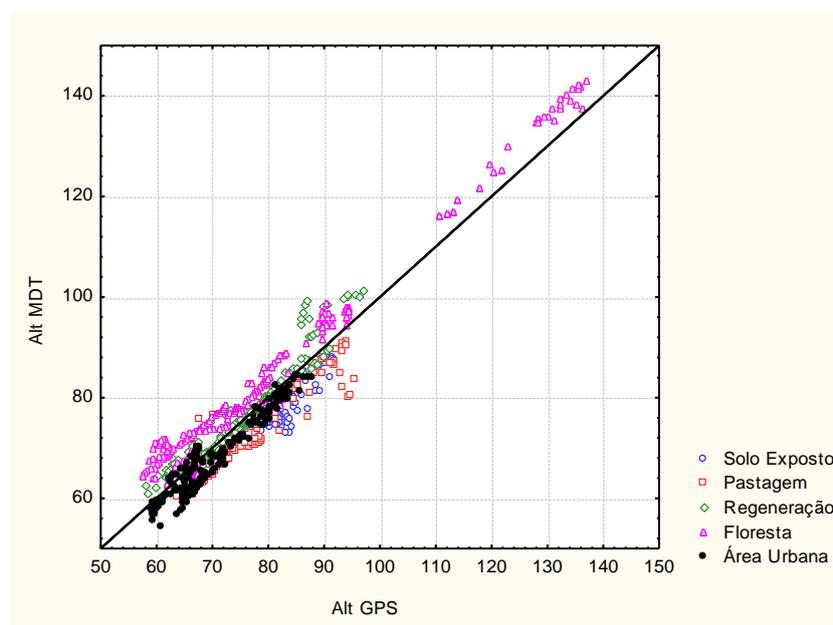


Figura 5.17 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS, para as diferentes classes de uso e ocupação do solo.

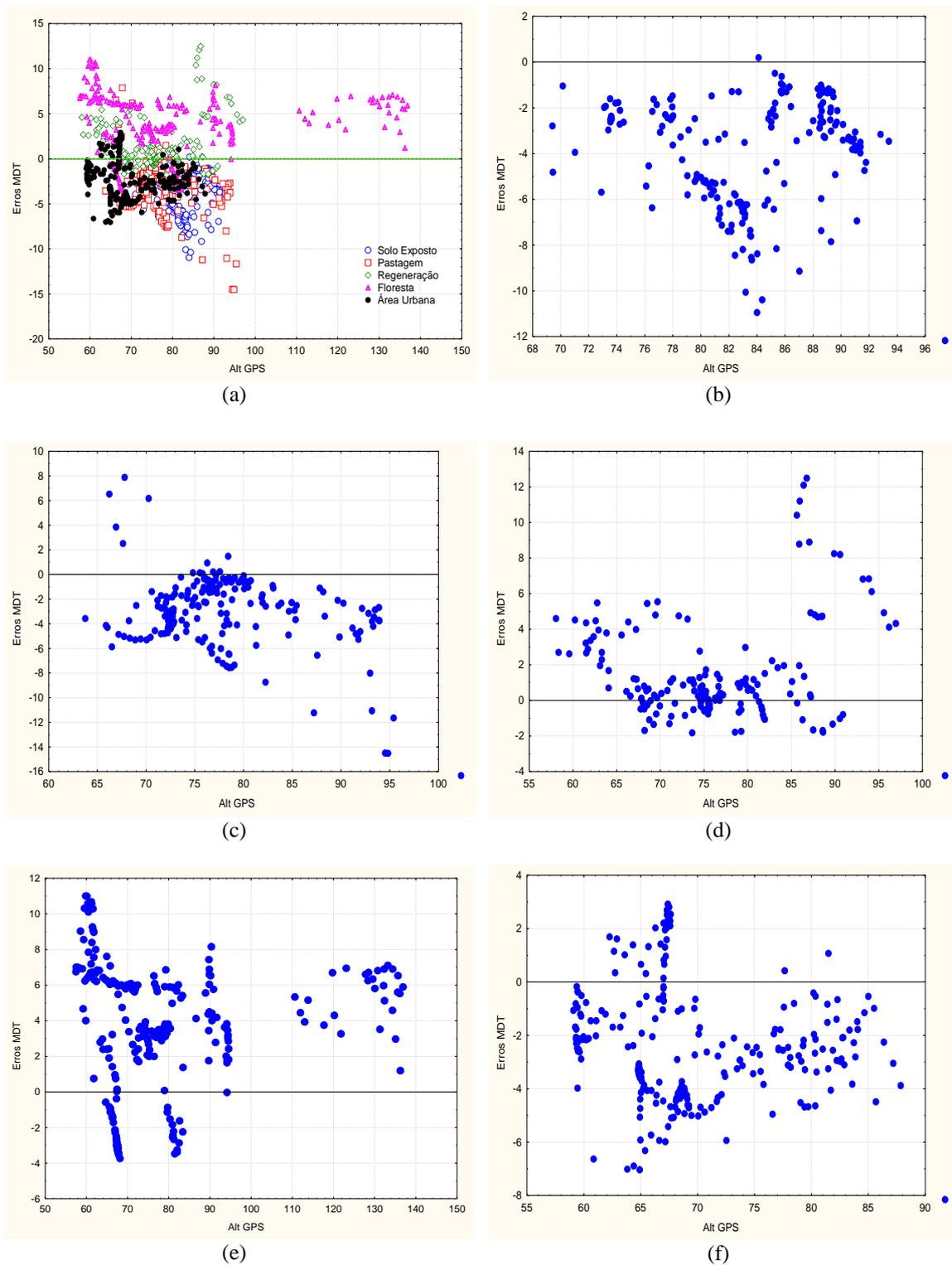


Figura 5.18 - Diagrama de dispersão dos erros do MDT e do GPS, para (a) todas as amostras; e para as amostras das classes de uso e ocupação do solo: (b) *Solo Exposto*, (c) *Pastagem*, (d) *Regeneração*, (e) *Floresta*, e (f) *Área Urbana*.

Pelos histogramas apresentados na Figura 5.20 pode-se observar a não normalidade dos erros. Note também que os maiores erros de subestimação ( $\varepsilon < -10$  m) ocorrem principalmente para as classes de *Pastagem* (5 pontos, correspondendo a 2,4% dos dados desta classe) e *Solo Exposto* (3 pontos, 1,7%) e, enquanto que os maiores erros de superestimação ( $\varepsilon > 10$  m) ocorrem para as classes de *Floresta* (11 pontos, 4,5%) e *Regeneração* (4 pontos, 2,2%).

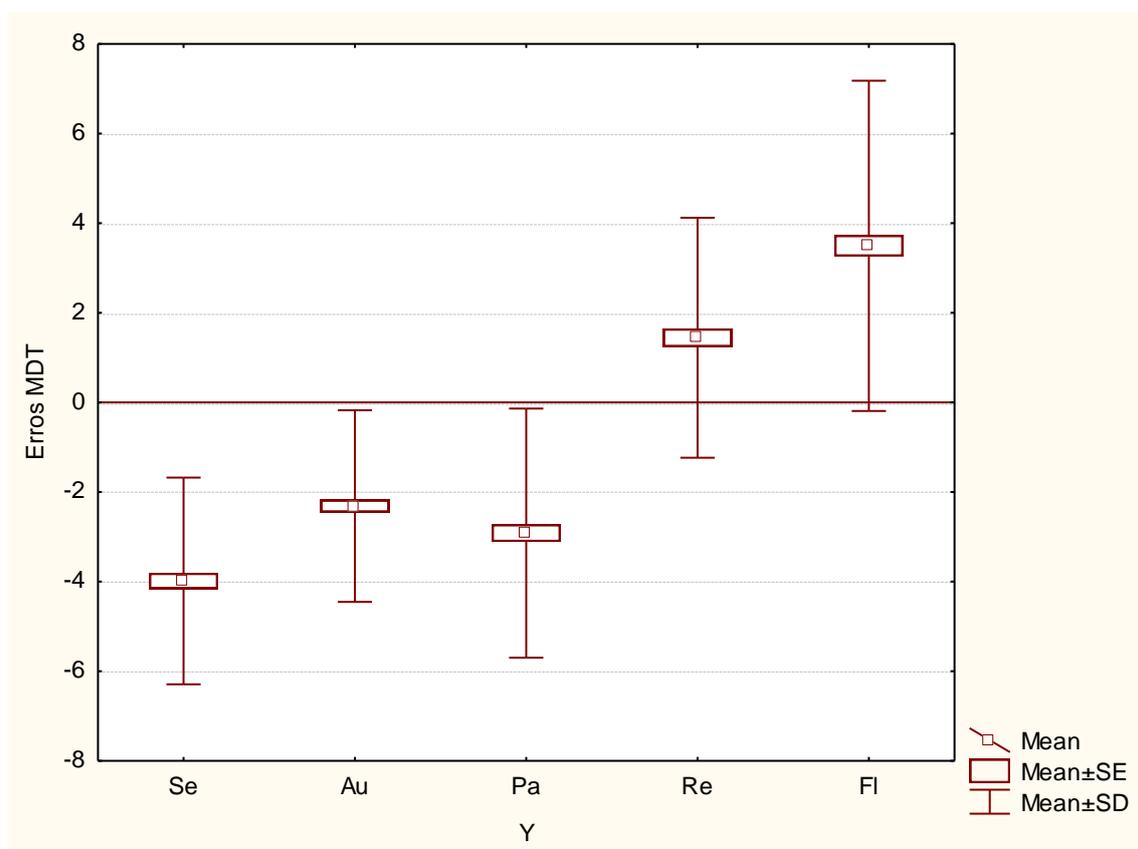
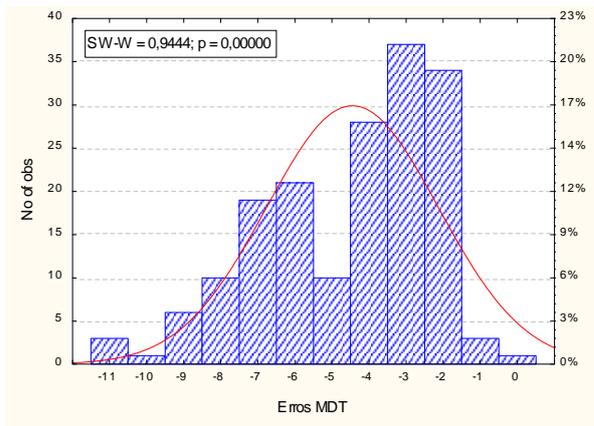
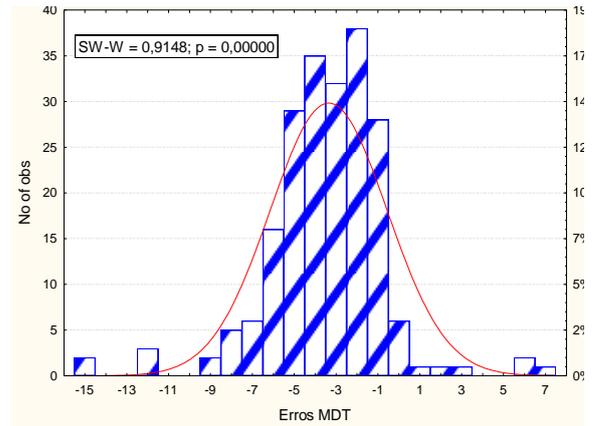


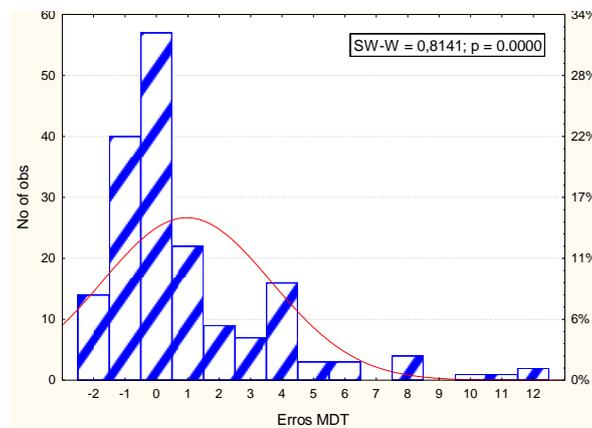
Figura 5.19 - Box-Plot dos erros do MDT para os diferentes uso e ocupação do solo.



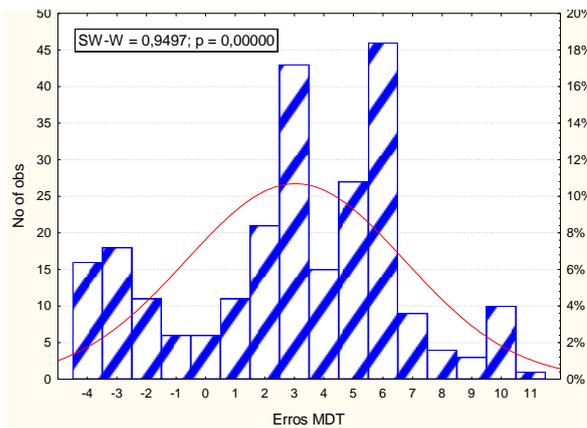
(a)



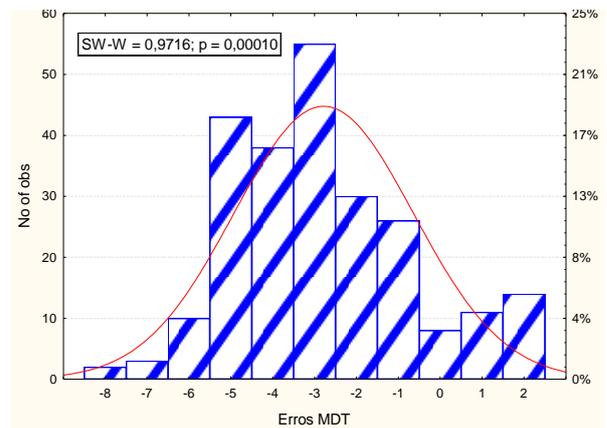
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.20 Histograma dos erros do modelo digital da banda P para as classes de uso e ocupação do solo: (a) *Solo Exposto*, (b) *Pastagem*, (c) *Regeneração*, (d) *Floresta* e (e) *Área Urbana*.

Analogamente à análise feita para as classes de gradiente de declividade, a Tabela 5.12 apresenta as escalas/classes segundo o enquadramento do MDT nos padrões cartográficos para cada classe de uso e ocupação do solo. Pode-se verificar agora que, devido à tendência apresentada por estas classes, existe uma diferença entre os enquadramentos somente considerando-se o desvio padrão, e pelo PEC. Verifica-se que, segundo as normas brasileiras, as regiões de *Regeneração* e *Área Urbana* estão enquadradas nos padrões da classe A, B ou C na escala 1:25.000, apesar da tendência encontrada. Por outro lado, as regiões de *Solo Exposto*, *Pastagem* e *Floresta*, atenderiam somente aos padrões 1:50.000 nas classes A e B. Note que estas classes são as que possuem maiores valores de RMSE, o qual considera também tanto a tendência quanto ao desvio padrão dos dados.

Tabela 5.12 - Enquadramento nos padrões cartográficos, segundo as classes de uso e ocupação do solo.

Classes de uso e ocupação do solo	Galo e Camargo (1994) - sem considerar tendência				PEC			NSSDA	
	PEC mínimo (Eq 2.28) (m)	Classe A	Classe B	Classe C	$ \varepsilon _{90\%}$ (m)	Classe A	Classe B	Classe C	Acurácia $1,96 \cdot RMSE$ (m)
<i>Solo Exposto</i>	3,18	1:25.000	1:25.000	1:25.000	7,1	1:50.000	1:50.000	1:25.000	9,02
<i>Área Urbana</i>	2,98	1:10.000	1:10.000	1:10.000	4,7	1:25.000	1:25.000	1:25.000	6,17
<i>Pastagem</i>	3,86	1:25.000	1:25.000	1:25.000	6,1	1:50.000	1:50.000	1:25.000	7,90
<i>Regeneração</i>	3,70	1:25.000	1:25.000	1:10.000	4,8	1:25.000	1:25.000	1:25.000	5,96
<i>Floresta</i>	5,15	1:50.000	1:25.000	1:25.000	7,1	1:50.000	1:50.000	1:25.000	9,96
<b>Todos</b>	5,82	1:50.000	1:25.000	1:25.000	6,5	1:50.000	1:50.000	1:25.000	8,00

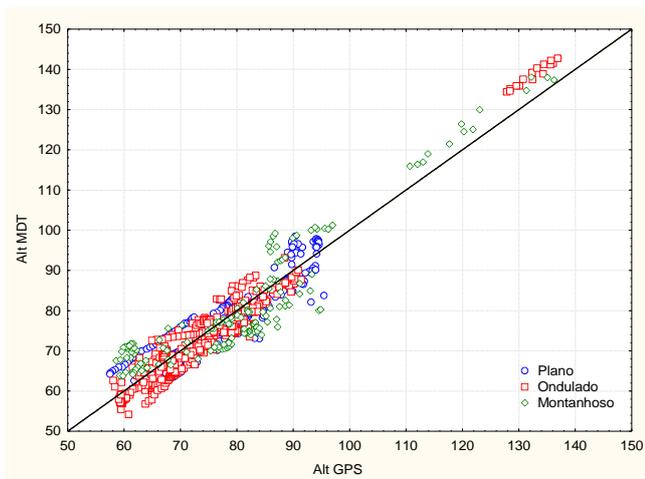
### 5.7.3 Estratos resultantes da interação de classes de gradiente de declividade e de uso e ocupação do solo.

Após o cruzamento das classes de gradiente de declividade e de uso e ocupação do solo, foram computadas as estatísticas dos pontos correspondentes a cada estrato, as quais são apresentadas na Tabela 5.13. As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam o gráfico de dispersão das altitudes do MDT e dos seus erros contra as altitudes observadas em campo, e a Figura 5.23 os *Box-plots* relativos aos diferentes estratos.

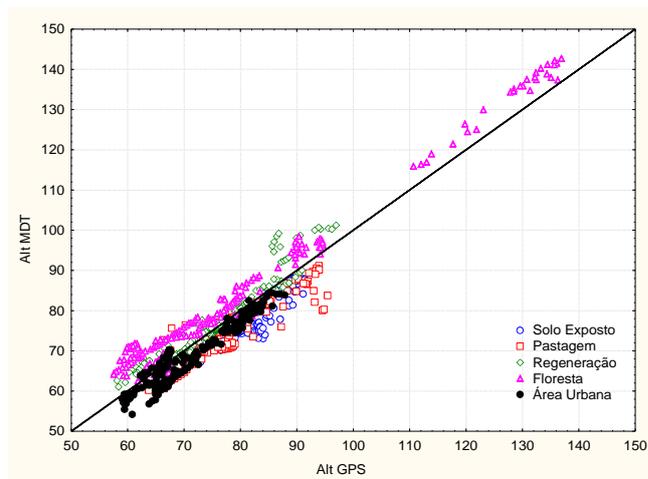
Pode-se notar que os maiores erros de subestimação ocorrem, principalmente, no cruzamento dos estratos de gradiente de declividade *Plano* e *Montanhoso* com os estratos de uso e ocupação do solo *Solo Exposto* e *Pastagem*. Por outro lado, os maiores erros de superestimação estão nos estratos *Montanhoso-Regeneração* e *Montanhoso-Floresta*. Através do teste *t*, a média dos erros poderia ser considerada igual a zero somente para o estrato *Plano-Regeneração*. Nota-se ainda que os estratos *Montanhoso-Pastagem*, *Montanhoso-Regeneração*, *Montanhoso-Floresta* e *Plano-Solo Exposto* são os que possuem as maiores dispersões. O RMSE, que considera tanto a tendência quanto a dispersão dos erros, possui seus maiores valores nos quatro últimos estratos, provenientes da classe de declividade *Montanhoso*.

Tabela 5.13. Estatísticas descritivas para os erros do MDT da banda P, segundo os estratos.

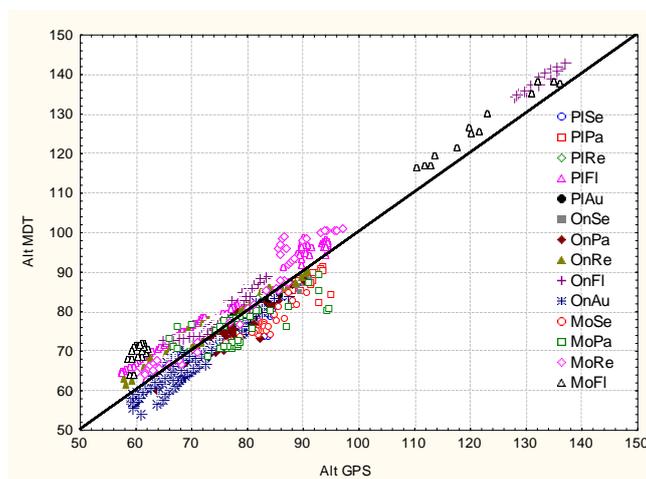
<b>Estratos</b>	<b>N</b>	<b>Mínimo (m)</b>	<b>Máximo (m)</b>	<b>Média (m)</b>	<b>DP (m)</b>	<b>DPmédia (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>
<b>Pl-Se</b>	100	-10,95	-0,49	-2,80	1,69	0,17	3,27
<b>Pl-Au</b>	54	-4,96	0,43	-2,23	1,18	0,16	2,52
<b>Pl-Pa</b>	104	-11,65	-0,10	-3,01	1,98	0,19	3,60
<b>Pl-Re</b>	77	-1,81	1,72	0,15	0,69	0,08	0,71
<b>Pl-Fl</b>	138	-3,73	8,16	2,19	3,78	0,32	4,37
<b>On-Se</b>	40	-7,05	0,19	-4,41	1,72	0,27	4,73
<b>On-Au</b>	186	-7,04	2,91	-2,34	2,35	0,17	3,31
<b>On-Pa</b>	58	-8,72	1,49	-2,33	1,53	0,20	2,79
<b>On-Re</b>	57	-1,78	5,54	1,32	2,19	0,29	2,56
<b>On-Fl</b>	73	-0,38	7,61	4,04	2,03	0,24	4,52
<b>Mo-Se</b>	33	-10,38	-3,08	-7,05	1,38	0,24	7,18
<b>Mo-Pa</b>	46	-14,52	7,88	-3,45	4,79	0,71	5,90
<b>Mo-Re</b>	45	-1,78	12,50	3,82	3,65	0,54	5,29
<b>Mo-Fl</b>	36	1,20	11,01	7,39	2,87	0,48	7,92
<b>Todos</b>	1047	-14,52	12,5	-0,696	4,02	0,12	4,08



(a)



(b)



(c)

Figura 5.21 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT e do GPS para os diferentes (a) gradientes de declividade, (b) uso e ocupação do solo e (c) estratos de declividade/uso e ocupação do solo.

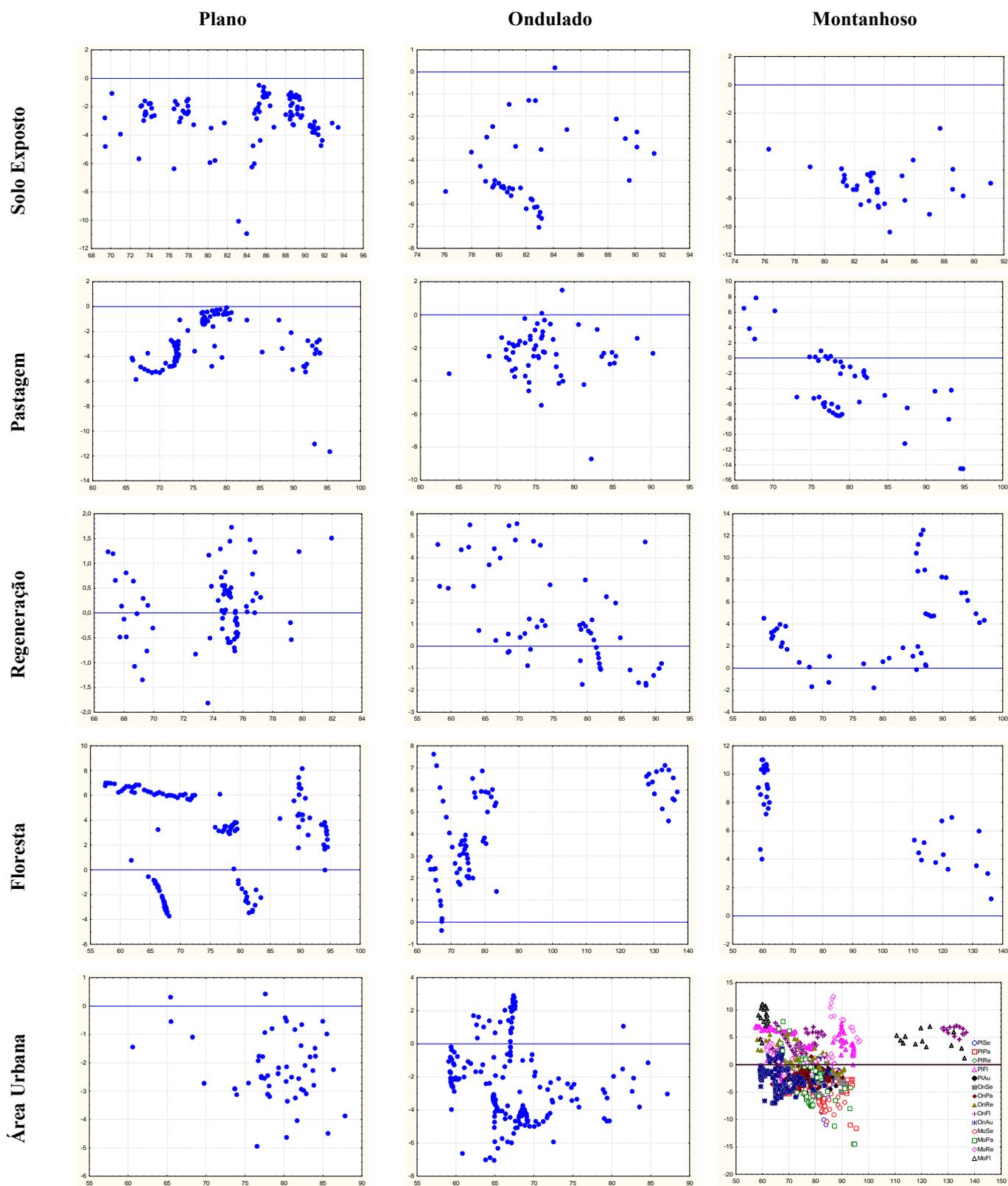


Figura 5.22 - Erros do MDT versus altitude GPS para os estratos.

Pela Figura 5.23 pode-se notar que os valores do MDT tendem a fornecer as maiores superestimativas a medida que se tem áreas com mais vegetação e com maiores gradientes de declividade. Por outro lado, os maiores erros de subestimação do MDT ocorrem em áreas com menos vegetação (principalmente *Solo Exposto*) e maiores gradientes de declividade.

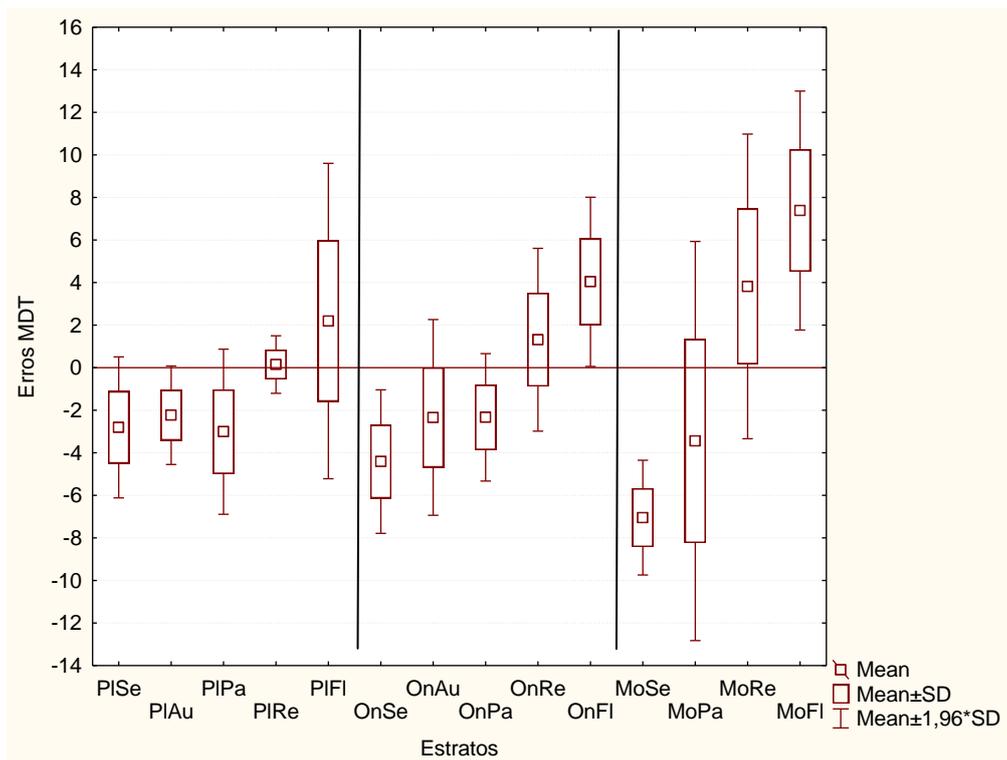


Figura 5.23 - *Box-plots* dos erros do MDT.

O teste de normalidade dos erros indicou que os estratos *PIRe*, *PIAu*, *MoSe*, *MoPa* ( $p = 0,51, 0,41, 0,56, 0,17$ , respectivamente) possuem distribuição gaussiana ao nível de significância de 5%, e os estratos *OnSe*, *OnFl* e *MoRe* ( $p = 0,02, 0,011, 0,03$ , respectivamente) ao nível de significância de 1%.

Pelo fato de não se poder supor que os erros para todos os estratos são normalmente distribuídos, pela quantidade não muito grande de amostras em cada estrato, e pelo fato de que para o PEC não somente a média dos erros é importante, mas também os seus desvios padrões, optou-se por aplicar o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov

para se testar a hipótese de que dois estratos quaisquer possuem a mesma distribuição dos erros. Tal estudo foi realizado sobre as classes de gradiente de declividade e de uso e cobertura do solo, em duas fases distintas. Buscou-se saber quais classes teriam a mesma distribuição dos erros e poderiam ser agrupadas em uma única classe, respeitando o critério de, primeiramente, não mesclar classes de distintas declividades e, posteriormente, não fundir distintas classes de uso do solo. Para cada classe de declividade (ou de uso do solo) o teste foi aplicado a todos os possíveis pares de estratos candidatos à fusão, e somente o par de maior valor- $p$  ( $p > 0,05$ ) foi agrupado. Tal procedimento terminou quando não houve mais possibilidade de novas fusões.

Iniciando o teste para cada classe de gradiente de declividade, o resultado final pode ser observado na Figura 5.24.

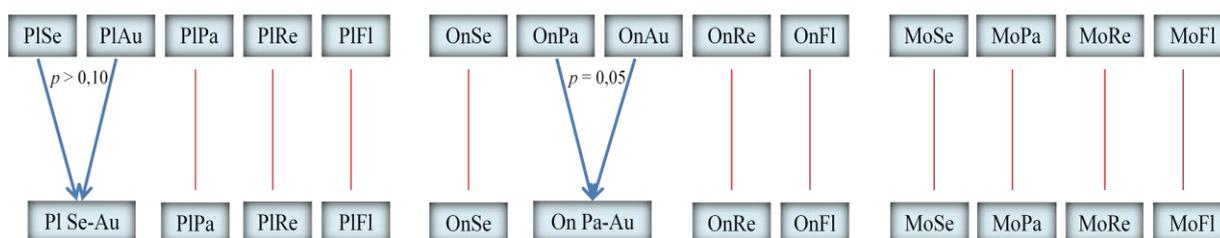


Figura 5.24 – Evolução e nova nomenclatura dos estratos agrupados na classe de gradiente de declividade.

Percebe-se na fase inicial que, para o gradiente de declividade *Plano*, as classes de uso do solo *Área urbana* e *Solo Exposto* foram agrupadas. Para o gradiente de declividade *Ondulado* foram agrupadas as classes *Área Urbana* e *Pastagem*, e para o gradiente de declividade *Montanhoso*, nenhuma das classes foram agrupadas. Na segunda fase, não ocorreram mais agrupamentos.

Esperava-se inicialmente que a classe *Área Urbana* possuísse erro médio significativamente diferente das demais conforme resultados obtidos por Norheim *et al.* (2002), devido aos problemas causados por sombras e presença de alvos naturais que apresentam um retroespalhamento próximo a refletores diédricos e triédricos. No entanto, esta classe foi agrupada às classes de *Solo Exposto* e *Pastagem* para os

gradientes de declividade *Plano* e *Ondulado*, respectivamente. Dois fatores podem elucidar esse fato. Primeiramente, como foi empregado o método de posicionamento relativo para o levantamento de campo nessas áreas, primou-se sempre pelo posicionamento do equipamento rastreador em áreas sem impedimento para o rastreo dos satélites, bem como nenhum ponto ter sido levantado sobre edificações. Segundo, a *Área Urbana* propriamente dita nesse município, é composta em sua quase totalidade de casas no nível térreo e muitas com área plana à correspondente a resolução do sensor que é de 25m<sup>2</sup> (Figura 5.25).



Figuras 5.25 – Condições de levantamento em área urbana.

Os *Box Plots* dos erros do MDT após os agrupamentos são apresentados na Figura 5.26.

Para as classes de uso e cobertura do solo, todos os testes de igualdade de distribuição para pares de estratos de mesmo uso do solo foram rejeitados ao nível de significância de 5%.

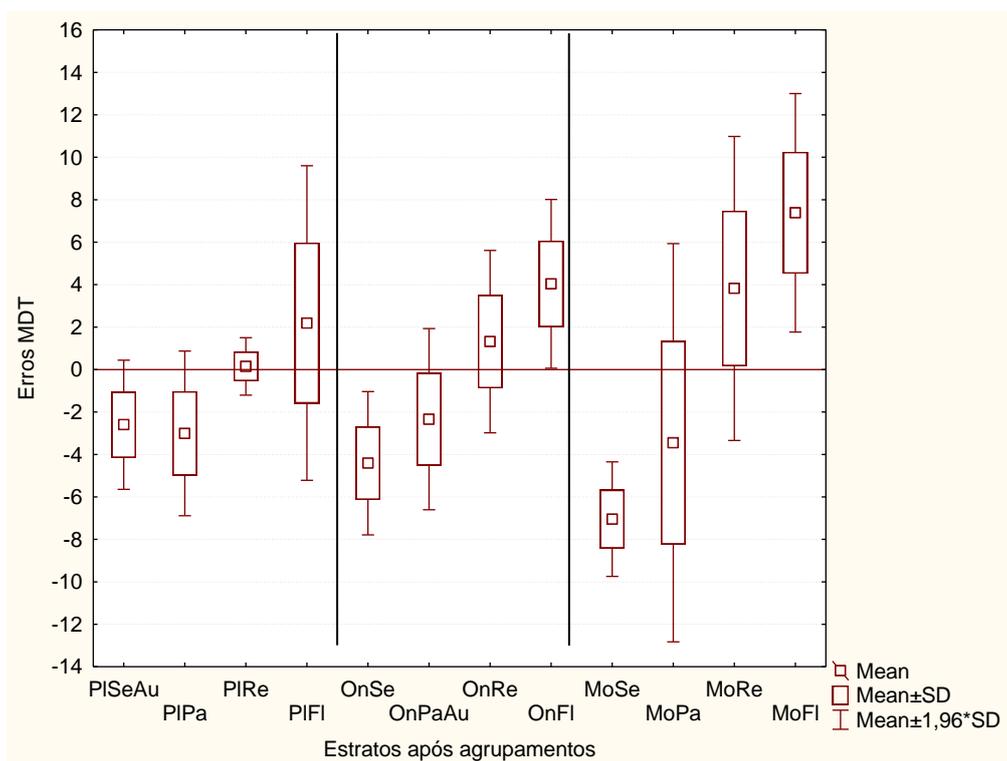


Figura 5.26 – *Box Plots* dos erros dos estratos após agrupamentos.

Pela análise feita pode-se observar que tanto as classes de gradiente de declividade quanto as classes de uso e cobertura do solo influenciam os erros do MDT. Pode-se dizer também que há uma interação entre estes fatores, uma vez que os erros do MDT para cada classe de uso do solo possuem comportamentos diferentes para as diferentes classes de gradiente de declividade.

A Tabela 5.14 apresenta as novas estatísticas para os estratos que foram agrupados.

Tabela 5.14 – Estatística descritiva para os estratos agrupados.

<b>Estratos Agrupados</b>	<b>N</b>	<b>Média (m)</b>	<b>DP (m)</b>	<b>DPmédia (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>
<b>PI-SeAu</b>	154	-2,60	1,55	0,13	3,03
<b>On-PaAu</b>	244	-2,34	2,18	0,14	3,19

A Tabela 5.15 apresenta o enquadramento de cada estrato segundo o PEC, e a acurácia segundo o NSSDA. Pode-se observar que, exceto pelo estrato *Montanhoso-Floresta*, todos os demais estratos enquadram-se em escalas maiores que 1:50.000.

Tabela 5.15 - Enquadramento nos padrões cartográficos, após o agrupamento dos estratos.

Estratos	Galo e Camargo (1994) - sem considerar tendência				PEC				NSSDA
	PEC mínimo (Eq 2.28) (m)	Classe A	Classe B	Classe C	$ \varepsilon _{90\%}$ (m)	Classe A	Classe B	Classe C	Acurácia $1,96*RMSE$ (m)
<b>Pl-SeAu</b>	2,13	1:10.000	1:10.000	1:10.000	4,3	1:25.000	1:25.000	1:25.000	5,94
<b>Pl-Pa</b>	2,67	1:25.000	1:10.000	1:10.000	5,0	1:25.000	1:25.000	1:25.000	7,06
<b>Pl-Re</b>	0,91	1:10.000	1:10.000	1:10.000	1,2	1:10.000	1:10.000	1:10.000	1,38
<b>Pl-Fl</b>	5,16	1:50000	1:25.000	1:25.000	6,6	1:50.000	1:50.000	1:25.000	8,57
<b>On-Se</b>	2,18	1:10.000	1:10.000	1:10.000	6,2	1:50.000	1:50.000	1:25.000	9,28
<b>On-PaAu</b>	3,04	1:25.000	1:25.000	1:10.000	4,7	1:25.000	1:25.000	1:25.000	6,26
<b>On-Re</b>	2,85	1:25.000	1:10.000	1:10.000	4,7	1:25.000	1:25.000	1:25.000	5,01
<b>On-Fl</b>	2,68	1:25.000	1:10.000	1:10.000	6,7	1:50.000	1:50.000	1:25.000	8,86
<b>Mo-Se</b>	1,72	1:10.000	1:10.000	1:10.000	8,5	1:50.000	1:50.000	1:50.000	14,07
<b>Mo-Pa</b>	6,13	1:50000	1:50000	1:25.000	7,8	1:50.000	1:50.000	1:50.000	11,56
<b>Mo-Re</b>	4,67	1:25.000	1:25.000	1:25.000	8,8	1:50.000	1:50.000	1:50.000	10,36
<b>Mo-Fl</b>	3,60	1:25.000	1:25.000	1:10.000	10,5	1:100.000	1:50.000	1:50.000	15,53
<b>Todos</b>	5,82	1:50000	1:25.000	1:25.000	6,5	1:50.000	1:50.000	1:25.000	8,00

### 5.8 Análise considerando a proporção de cada estrato

As análises globais dos erros das seções 5.4 a 5.6 foram efetuadas para todos os pontos, não se considerando os estratos a que os mesmos pertenciam. Deve-se considerar, entretanto, que a amostragem dos pontos para a coleta de pontos durante o trabalho de campo não foi efetuada de maneira aleatória, uma vez que se desejava que fosse coletado um número de pontos razoavelmente grande (maiores que 30) em cada estrato. Portanto, para que se tenha uma estimativa correta da média e do desvio padrão dos erros altimétricos para toda a área de estudo, é necessário que se considere a proporção de cada estrato na mesma.

Denominando-se  $\bar{\varepsilon}_k$ ,  $MSE_k$  e  $p_k$ , respectivamente, o erro médio, erro médio quadrático, e proporção do estrato  $k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , onde  $K$  é o número de estratos, tem-se que uma estimativa da média dos erros, e do erro médio quadrático para toda a área de estudo são dadas por:

$$\hat{\mu}_\varepsilon = \sum_{k=1}^K p_k \bar{\varepsilon}_k \quad (5.1)$$

$$MSE_\varepsilon = \sum_{k=1}^K p_k MSE_k. \quad (5.2)$$

A variância estimada dos erros para toda a área de estudo é dada por:

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = MSE_\varepsilon - \hat{\mu}_\varepsilon^2. \quad (5.3)$$

Supondo-se que os erros sejam normalmente distribuídos tem-se que 90% dos erros absolutos seriam menores que  $|\hat{\mu}_\varepsilon| + 1,645\hat{\sigma}_\varepsilon$ .

Para os dados de altimetria é mostrado na Tabela 5.16 os estratos, as proporções em que eles ocorrem na área de estudo (excetuando-se as áreas de nuvens, sombra e água), os erros médios e o valor do MSE de cada estrato.

Tabela 5.16 – Proporções de cada estrato na área de estudo, seus respectivos erros médios e MSEs.

<b>Estratos</b>	$p_k$	$\bar{\varepsilon}$	$MSE_k$
<b>Pl-SeAu</b>	0,013	-2,60	9,18
<b>Pl-Pa</b>	0,062	-3,01	12,96
<b>Pl-Re</b>	0,051	0,15	0,50
<b>Pl-Fl</b>	0,507	2,19	19,11
<b>On-Se</b>	0,003	-4,41	22,42
<b>OnPaAu</b>	0,064	-2,34	10,19
<b>On-Re</b>	0,031	1,32	6,54
<b>On-Fl</b>	0,239	4,04	20,42
<b>Mo-Se</b>	0,000	-7,05	51,54
<b>Mo-Pa</b>	0,003	-3,45	34,78
<b>Mo-Re</b>	0,002	3,82	27,95
<b>Mo-Fl</b>	0,024	7,39	62,77

Tem-se, portanto, que os valores estimados da média e do desvio padrão dos erros são expressos por:

$$\hat{\mu}_\varepsilon = \sum_{k=1}^K p_k \bar{\varepsilon}_k = 1,91 \text{ m}$$

$$\hat{\sigma}_\varepsilon = \sqrt{MSE_\varepsilon - \hat{\mu}_\varepsilon^2} = \sqrt{18,14 - 1,91^2} = 3,81 \text{ m.}$$

Portanto, 90% dos erros absolutos seriam menores que  $|\hat{\mu}_\varepsilon| + 1,645\hat{\sigma}_\varepsilon = 8,17 \text{ m}$ .

Note que a estimativa do erro médio, que era de -0,696 m para os 1047 pontos, é agora de aproximadamente 1,9 m. Este valor está mais próximo do esperado para a região em estudo, uma vez que mais de 70% dela é coberta por florestas e que o MDT superestima os verdadeiros valores da altimetria para esta classe de uso e cobertura do solo.

Portanto, pelas Normas Técnicas da Cartografia Brasileira o produto cartográfico seria enquadrado na escala 1:50.000 nas classes A, B ou C. Pelas Normas Técnicas do NSSDA a acurácia vertical absoluta seria de 8,35 m.

A metodologia apresentada nesta seção poderia ser utilizada em regiões similares à da região em estudo, de maneira que, através de estratificação prévia da área de estudo, poder-se-ia ter a priori uma estimativa da precisão do produto cartográfico.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar planialtimetricamente os produtos gerados a partir do sensor OrbiSAR e processados totalmente pela empresa OrbiSat da Amazônia Ind. e Aerolevanteamento S.A.. Buscou-se identificar possíveis fatores que afetariam a acurácia posicional dos produtos como uso e cobertura do solo e o gradiente de declividade. Visando a validação dos produtos cartográficos, foi realizada uma avaliação sob as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira (PEC) e da cartografia norte-americana (NSSDA).

Os produtos cartográficos da área de estudo que serviram de insumos para as análises, foram obtidos de 12 faixas do aerolevanteamento realizado pela empresa OrbiSat no período de 30 de novembro a 09 de dezembro de 2008. Cada imageamento de faixa durava em média 21 minutos e foram sempre realizados no turno da tarde em razão das condições meteorológicas da região nesse período do ano.

Em gabinete, a área de estudo foi estratificada com base nas classes gradiente de declividade e uso e cobertura do solo gerando um mapa de estratos. Por limitações de dados cartográficos da região, o gradiente de declividade usado para o preparo do campo foi obtido do próprio modelo a ser avaliado. A classe aspecto teve que ser desconsiderada dada a impossibilidade de se definir exatamente a qual faixa e sobre qual visada foi imageada uma certa região do terreno. Isso ocorre porque, distintas bandas correspondem a distintas faixas de sobreposição. Soma-se ainda o fato dos sensores terem visada fixa e a aeronave imagear nos dois sentidos de uma dada direção.

Sobre o mapa de estratos, gerou-se uma malha de pontos distanciados entre si de 100m, que definiam áreas de 1 ha. Esse artifício foi implementado para que esses pontos pudessem servir de elementos a serem amostrados e posteriormente medidos. Entretanto, outro artifício foi necessário e consistiu na inserção de corredores de exclusão entre estratos adjacentes. Isso visava evitar o sorteio de pontos dessas regiões, dada a incerteza que pode advir da transição entre estratos vizinhos.

Com esses pontos foi realizada uma amostragem aleatória com os estratos possíveis de serem levantados por rastreadores GPS e Estação Total. Importante lembrar que a região amazônica apresenta sérios problemas de vias de acesso, deslocamentos extremamente dificultado em ambiente de floresta tropical e sérios conflitos por posse de terra com a população indígena, o que implicou em nova amostragem no caso do sorteio coincidir com essas áreas problemáticas.

Como referências foram coletadas amostras em 14 estratos de interesse, dos 15 iniciais. Essa redução ocorreu por não haver, em quantidade significativa na área de estudo, estratos com características *Área Urbana* e em gradiente de declividade *Montanhoso*. Foram levantados, processados e validados 1971 pontos com Estação Total e posicionamento relativo (método estático e *Stop-and-go*). Porém, durante a análise visual foi detectado a ausência de informações altimétricas no modelo digital do terreno (MDT). Essa ausência de dados fez com que diversos pontos medidos nessas regiões não pudessem ser aproveitados nesse trabalho. Assim, o total de pontos efetivamente utilizados nessa análise totalizou 1518 pontos. Destes pontos, 105 foram utilizados para avaliar a acurácia posicional planimétrica das ortoimagens e aproveitados também para a avaliação altimétrica; 471 foram coletados para avaliar o comportamento dos erros altimétricos utilizando pontos levantados em campo por irradiação com Estação Total; e 1047 pontos foram utilizados para avaliar a acurácia posicional altimétrica do MDT da banda P.

Constatou-se que as ortoimagens das bandas X e P, e conseqüentemente todos os demais produtos delas oriundos, estavam deslocados planimetricamente ao ser comparado com os 105 pontos monoscopicamente identificáveis e levantados para essa exclusiva finalidade. Foi realizada sua correção geométrica conforme mostrado no Capítulo 4, com deslocamento na direção Norte de 14,36m e Leste 0,54m, aproximadamente. A causa desse deslocamento deve-se ao fato desses produtos cartográficos não terem sido processados com as coordenadas dos *corners reflectors*. Os demais parâmetros de uma Transformação Afim não apresentaram anormalidades, a saber: Escalas em N e em E, Fator de Não-Ortogonalidade e Rotação dos Eixos. A análise de tendência apontou, para um nível de significância de 5%, uma tendência na

direção Norte. A partir da análise planimétrica de precisão e exatidão as ortoimagens das bandas X e P foram classificadas, segundo o PEC, nas classes A e B (1:25.000) e C (1:10.000), caso seja removida a tendência.

A avaliação cartográfica sob as normas técnicas da cartografia brasileira considera que pelo menos 90% dos pontos planimétricos, no caso 95 pontos, não apresentem erros superior ao PEC planimétrico. Verificou-se que 90% dos erros planimétricos eram inferiores a 19,56m. Portanto, por essas normas as ortoimagens das bandas X e P atenderiam aos padrões cartográficos da classe A na escala 1:50.000 e das classes B e C na escala 1:25.000. No entanto, corrigindo-se geometricamente as ortoimagens a partir dos parâmetros de translações determinados para as coordenada N (-14,36m) e E (0,54m), 90% dos erros planimétricos foram inferiores a 9,31m. Portanto, as ortoimagens passariam a atender os padrões cartográficos das classes A, B e C na escala 1:25.000.

A avaliação cartográfica sob as normas técnicas da cartografia norte-americana (NSSDA) permitiram afirmar que o conjunto de dados testados apresentou aproximadamente 24,18m de acurácia horizontal a 95% de nível de confiança. Esse valor de acurácia permitiu também determinar a escala máxima segundo o ASPRS, que resultou na escala final de 1:96.720. Entretanto, corrigida geometricamente a ortoimagem, a acurácia resultará em 11,31m, com escala final de 1:45.278.

Concluída essa etapa, procedeu-se a análise altimétrica sobre o modelo digital do terreno proveniente dos dados da banda P. Para esta avaliação foi necessário corrigir geometricamente a ortoimagem. A presença desse deslocamento planimétrico inviabiliza o uso do MDT original se não for realizada previamente tal correção, pois se corre o risco de tomar por verdade altitudes de pontos não homólogos.

Inicialmente foi verificado a existência de aproximadamente 9,08% de áreas correspondentes a terras emersas sem informação altimétrica. Para essas regiões foram levantados 175 pontos, havendo um predomínio das classes de gradiente de declividade *Plano* e *Ondulado*. Nestes pontos também se verificou a prevalência da classe *Regeneração*, não obstante a classe *Floresta* ser a classe de uso e cobertura do solo de maior ocorrência na área estudada. Visualmente, pode-se observar que estas áreas sem

informação altimétrica encontram-se próximas do Rio Negro. Os pontos levantados em campo servirão para avaliar os produtos processados pela DSG, os quais possuem a informação de altimetria para toda a área. Este estudo não foi realizado porque os produtos processados pela DSG não foram disponibilizados até o momento de conclusão dessa dissertação.

Da análise exploratória das 3 nuvens de pontos levantadas em campo, irradiadas com o uso de Estação Total e totalizando pelo menos 150 pontos, evidenciou-se em 2 delas erros na direção Norte-Sul (*across-track*). Nessas nuvens, houve um aumento da subestimação no sentido para o Norte a medida que a observação altimétrica era realizada afastando-se da Estação Total. Por outro lado, na direção Leste-Oeste (*along-track*) não foi possível verificar uma variação proporcional dos erros com a distância à Estação Total. Mais estudos são necessários para se determinar as razões desses erros aparentemente sistemáticos.

Uma análise da altimetria do MDT da banda P sobre 1047 pontos, mostrou que os erros encontrados (definido como a diferença entre as altitudes medidas no MDT e com o GPS), da mesma forma que o observado com os erros planimétricos, não puderam ser considerados como tendo uma distribuição gaussiana. Entretanto, como o número de observações era razoavelmente grande, foram efetuadas as análises de tendência e precisão e as devidas avaliações de acordo com as normas PEC e NSSDA.

A análise de tendência mostrou que, para qualquer nível de significância prático, o valor-*p* era menor que 0,0001 e que, portanto, não se pode considerar o MDT livre de tendências significativas. Para a análise de precisão, e considerando não existir tendência nos dados observados e que os mesmos tenham distribuição normal, ao nível de significância de 5%, o padrão cartográfico de classe A somente seria atendido para a escala de 1:50.000, enquanto que para as classes B e C, o padrão cartográfico seria atendido na escala 1:25.000.

A avaliação cartográfica sob as normas técnicas da cartografia brasileira mostrou que 90% dos erros altimétricos foram inferiores a 6,5 m e, portanto, atenderia aos padrões cartográficos das classes A e B na escala 1:50.000 e da classe C na escala 1:25.000.

A avaliação cartográfica sob as normas técnicas da cartografia norte-americana mostrou que os erros oriundos do MDT apresentaram RMSE de 4,08 m, podendo-se afirmar ao final da avaliação que o MDT possui um conjunto de dados que apresentam 7,99 m ( $1,96 \times \text{RMSE}$ ) de acurácia vertical absoluta a 95% de nível de confiança.

Na avaliação altimétrica por estratos, verificou-se que os valores médios e os desvios padrões obtidos do MDT e do GPS são bastante similares. Ficou evidente que as maiores variâncias ocorrem para a classe *Floresta* nos gradientes de declividade *Ondulado* e *Montanhoso*, e para *Regeneração* no gradiente de declividade *Montanhoso*. Para uma mesma classe de gradiente de declividade, a classe *Floresta* apresentou a maior variância e que, independente da declividade do terreno, o MDT tende a superestimar as altitudes nas classes *Regeneração* e *Floresta*, enquanto para as demais classes tende a uma subestimação das altitudes.

A análise por estratos foi inicialmente realizada considerando a classe gradiente de declividade. Nessa análise, a partir dos valores dos desvios padrões dos erros, foram calculados, segundo a análise de exatidão de Galo e Camargo (1994), os valores do PEC mínimo que permitem o enquadramento do MDT nos padrões cartográficos. As escalas/classes correspondentes para cada classe de gradiente de declividade mostraram que as regiões com menores gradientes de declividade (*Plano* e *Ondulado*) estão enquadradas nos padrões da classe A, na escala 1:50.000, ou das classes B e C na escala 1:25.000, apesar da tendência encontrada. Mostraram também que as regiões com maiores gradientes de declividade (*Montanhoso*), pelo fato dos erros possuírem alta variabilidade e não serem normalmente distribuídos, enquadram-se na escala 1:50.000 para todas as classes.

Quanto às avaliações sob as normas cartográficas brasileira, verificou-se que para as regiões com menores gradientes de declividade (*Plano* e *Ondulado*), o enquadramento coincidiu com o da análise sugerida por Galo e Camargo. Entretanto, as regiões com maiores gradientes de declividade (*Montanhoso*) seriam enquadradas na classe A somente na escala 1:100.000, e na classe B na escala 1:50.000. Quanto às normas NSSDA, a acurácia da classe *Plano*, *Ondulado* e *Montanhoso* foi de 6,64 m, 6,97 m e 12,79 m, respectivamente.

A análise por estratos considerando as classes de uso e ocupação do solo mostrou que o MDT possui uma tendência a subestimar as altitudes nas classes com menos vegetação (*Solo Exposto*, *Pastagem* e *Área Urbana*), e uma tendência a superestimar as altitudes nas classes com mais vegetação (*Regeneração* e *Floresta*). As classes com maiores variâncias e também com maiores valores de RMSE (e que, conseqüentemente influenciam o enquadramento do produto cartográfico no PEC) são as classes de *Solo Exposto*, *Pastagem* e *Floresta*. Analogamente à análise feita para as classes de gradiente de declividade verificou-se para o enquadramento do MDT nos padrões cartográficos brasileiro que as regiões de *Regeneração* e *Área Urbana* estão enquadradas nos padrões da classe A, B ou C na escala 1:25.000, apesar da tendência encontrada. Por outro lado, as regiões de *Solo Exposto*, *Pastagem* e *Floresta*, atenderiam somente aos padrões 1:50.000 nas classes A e B. . Para a classe C, todas as classes de uso e cobertura do solo atenderiam a escala 1:25.000.

A análise dos estratos resultantes da interação de classes de gradiente de declividade e de uso e cobertura do solo mostrou que os maiores erros de subestimação ocorrem, principalmente, no cruzamento dos estratos de gradiente de declividade *Plano* e *Montanhoso* com os estratos de uso e cobertura do solo *Solo Exposto* e *Pastagem*. Por outro lado, os maiores erros de superestimação estão nos estratos *Montanhoso-Regeneração* e *Montanhoso-Floresta* e as maiores dispersões nos estratos *Montanhoso-Pastagem*, *Montanhoso-Regeneração*, *Montanhoso-Floresta* e *Plano-Solo Exposto*.

Buscou-se ainda saber quais classes teriam a mesma distribuição dos erros e poderiam ser agrupadas em uma única classe, respeitando o critério de, primeiramente, não mesclar classes de distintas declividades e, posteriormente, não fundir distintas classes de uso do solo. Para o primeiro caso, verificou-se que para o gradiente de declividade *Plano*, as classes de uso e cobertura do solo *Área urbana* e *Solo Exposto* foram agrupadas. Para o gradiente de declividade *Ondulado* foram agrupadas as classes *Área Urbana* e *Pastagem*, e para o gradiente de declividade *Montanhoso*, nenhuma das classes foram agrupadas. Para as classes de uso e cobertura do solo, todos os testes de igualdade de distribuição para pares de estratos de mesmo uso e cobertura do solo foram rejeitados ao nível de significância de 5%.

Quanto às avaliações sob as normas cartográficas brasileira, o produto cartográfico seria enquadrado na escala 1:50.000 nas classes A, B ou C. Pelas Normas Técnicas do NSSDA a acurácia vertical absoluta seria de 8,35 m.

A análise individual permitiu determinar que há influência entre as categorias, o que justifica a análise por estratos. De maneira geral, observa-se que as classes de uso e cobertura do solo possuem uma influencia maior sobre a tendência do MDT, enquanto que o gradiente de declividade influencia mais a variabilidade dos erros. Entretanto, existe também uma interação entre esses dois fatores, que pode ser notada pela comparação entre o comportamento dos erros, tanto em tendência quanto em variabilidade, para uma mesma classe de uso e cobertura do solo em duas classes distintas de gradiente de declividade (como, por exemplo, a de *Solo Exposto* em gradientes *Plano* e *Montanhoso*).

A análise, considerando a proporção de cada estrato na área de estudo, mostrou que 90% dos erros absolutos seriam menores que 8,17 m o que, segundo as Normas Técnicas da Cartografia Brasileira, classifica o produto na escala 1:50.000 nas classes A, B e C. Pelas Normas Técnicas do NSSDA a acurácia vertical absoluta seria de 8,35 m. Verificou-se ainda que a estimativa do erro médio que era de -0,67 m passou a aproximadamente 1,9 m. Este valor está mais próximo do esperado para a região em estudo uma vez que mais de 70% dela é coberta por florestas e que o MDT superestima os verdadeiros valores da altimetria para esta classe de uso e cobertura do solo.

Dado o exposto, os produtos cartográficos avaliados serviriam aos propósitos da DSG no mapeamento do vazio cartográfico, uma vez que esta Diretoria pretende elaborar produtos cartográficos planialtimétricos nas escalas 1:100.000 e 1:50.000.

As principais sugestões para trabalhos futuros consistem em, inicialmente, avaliar as ortoimagens processadas pela DSG e que efetivamente serão os insumos para o mapeamento sistemático do Projeto Radiografia da Amazônia. Sugere-se também uma análise das imagens de coerência, o Modelo Digital de Superfície e a altura interferométrica. Uma análise conjunta do MDT e do MDS poderá ser útil para uma

melhor representação da superfície, através da confecção de modelos digitais de elevação híbridos.

Igualmente importante é pesquisar sobre os erros altimétricos sistemáticos observados nos pontos levantados em campo através de irradiação com o uso de Estação Total, e avaliar os erros altimétricos do MDT processado pela DSG, nas regiões emersas e com ausência de informação altimétrica no MDT processado pela OrbiSat.

A metodologia apresentada, considerando a proporcionalidade de cada estrato na área de estudo, poderia ser utilizada em regiões similares, de maneira que, através de estratificação prévia da área de estudo, poder-se-ia ter a priori uma estimativa da precisão do produto cartográfico.

Relevante também é o estudo da classe *Área Urbana* no gradiente de declividade Montanhoso e outro em áreas que não se limitassem ao predomínio de pequenas edificações.

No tocante ao preparo de campo, sugere-se minimizar ao máximo a distância temporal entre as todas as imagens usadas como referência. Prefere-se que as mesmas também tenham a mesma resolução espacial.

Importante ressaltar que trabalhos de campo nessas regiões imperam em minucioso preparo. Dadas as insalubres características da região, temperaturas, umidade e pluviosidade altas, aliadas à falta de infra-estrutura adequada e altas taxas de incidência de doenças tropicais, como a malária, faz-se com que o preparo do material, sanitário e pessoal devam ser priorizados a todo instante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. M.; MIKHAIL, E. M. **Surveying** - theory and practice. 7. ed. Boston: WCB McGraw-Hill, 1998. 1167p.

ASPRS Specifications and Standards Committee. ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1990, v. 56, 7, p. 1068-1070.

BERALDO, P.; SOARES S. M. **GPS** - introdução e aplicações práticas. Criciúma: Editora e Livraria Luana Ltda., 1995. 148p.

BERNHARDSEN, T. **Geographic Information Systems** - an introduction. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002. 428p.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. **Elementos de amostragem**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2005. 274p.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. 2. ed. New York, NY: The Guilford Press, 1996. cap. 7, p. 201-237.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. **GlobeSAR program**. Ottawa, CA, 2001. 1 CD-ROM.

CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA (CENSIPAM). **Subprojeto cartografia terrestre**, Documento de Referência do Acordo de Cooperação Técnica nº 03/2008, 2008. 27 p. Convênio celebrado entre o CENSIPAM / Exército Brasileiro (EB) / Marinha Brasileira (MB) / Força Aérea Brasileira (FAB) / Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

CHAGAS, C. S., FERNANDES FILHO, E. I., ROCHA, M. F. CARVALHO JUNIOR, M. F., NETO, N. C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, Campina Grande, 2010

CHORLEY, R.J. **Spatial analysis in geomorphology**. London: Methuen & Co Ltd., 1972. 393p.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Legislação Federal.

CORREIA, A.H. **Polarimetria e interferometria de dados SAR**: fundamentos e aplicações para uso e cobertura da terra. 2005. 48 p. Exame de qualificação – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

CORREIA, A. H. **Método automático para calibração polarimétrica de imagens SAR**. 2009. 307 p. (INPE-16349-TDI/1557). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

CORREIA, A.H. Metodologias e Resultados Preliminares do Projeto Radiografia da Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011, p. 8083-8090.

DE BIASE, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista de Geografia**, v. 6, p. 45-60, 1993.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG), 2000. **Relatório técnico do teste de aerolevante radar nas bandas "P" e "X", em Santarém-PA**. Disponível em <<http://www.concar.ibge.gov.br/Plano/pcn10.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

DUTRA, L.V.; ELMIRO M. T.; FILHO B. S. S.; 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, 2002, Toronto, Canadá. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2002, v. 6, p. 3617-3619.

DUTRA, L.V.; MURA J.C ; FREITAS C. C.; SANTOS J. R; ELMIRO, M. T. Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética – Princípios e Aplicações. In: WORKSHOP EM TRATAMENTO DE IMAGENS, 4, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p. 4-13.

ELMIRO, M. A. T. **Correção de Modelos Digitais de Elevação InSAR através de superfícies de ajustes geradas por métodos de interpolação espacial**. 2008. 207 p. (INPE-15382-TDI/1401). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

ESTES, J.E.; MOONEYHAN, D.W., Of maps and myths. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 60, p. 517-524, 1994.

FELGUEIRAS, C. A.; ERTHAL, G. J. Aplicações de modelos numéricos de elevação e integração com imagens digitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1988, p. 485-490.

FONTANA, R. D.; CHEUNG, W.; STANSELL, T. The modernized L2 civil signal. **GPS World**, p. 28-34, Sept. 2001.

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência sar para classificação do uso da terra: Floresta Nacional de Tapajós**. 2003. 137 p. (INPE-9612-TDI/842). Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1., 1994, Florianópolis. **Anais...** Disponível em: <[http://www2.fct.unesp.br/dcartog/galo/pdf/Galo\\_Camargo\\_1994.pdf](http://www2.fct.unesp.br/dcartog/galo/pdf/Galo_Camargo_1994.pdf)> Acesso em: 10 jan. 2010.

GELAUTZ, M.; PAILLOU, P.; CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A. Radar stereo- and interferometric-derived digital elevation models: comparison and combination using Radarsat and ERS-2 imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 24, p. 5243-5264, Dec. 2003.

GENS, R. **Quality assessment of SAR interferometric data**. 1998. 141 p. (ISBN 90 6164 155 1). Tese (PhD in Engineering) – Hannover University, Hannover. 1998.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. 3. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1998. v. 2, 896p.

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.

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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades@**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=130380>> Acesso em: 01 mar. 2010

ITAME, O.Y. **Controle de qualidade aplicado na modelagem digital de terreno**. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2001.

ITT Visual Information Solutions. **IDL 7.0.2/ENVI 4.5**, 2008. Disponível em <<http://www.ittvis.com/ProductServices.aspx>>. Acesso em: 15.mar.2010.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2000. cap.8, p. 616-706.

LUDWIG, R.; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 5, p. 339-358, Aug. 2006.

MADSEN, S. N. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 246-256, Jan. 1993.

MADSEN, S. N.; MARTIN, J. M.; ZEBKER, H. A. Analysis and evaluation of the NASA/JPL TOPSAR across-track interferometric SAR system. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 383-391, Mar. 1995.

MAUNE, D. F. **Digital Elevation Model technologies and applications: the DEM users manual**. 2. Ed., MA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007. 655p.

MONICO, J. F.G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**. São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287p.

MOURA, P. **Calibração dos Modelos Digitais de Elevação gerados por interferometria AR nas bandas P e X**. 2005. 238 p. (INPE-15241-TDI/1328). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

MOURA, P.; CORREIA, A.H.; STELLE, C. A. Avaliação Preliminar do Modelo Digital de Elevação Obtido a Partir de Imagens SAR Interferométricas (Banda P) do Projeto Radiografia da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 25, 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBC, 2011. p. 240-246.

MURA, J.C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: Sistema Geo-InSAR**. 2000. 159 p. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada). São José dos Campos, INPE. 2000.

NATIONAL STANDARD FOR SPATIAL DATA ACCURACY (NSSDA). **Positional accuracy handbook** - manual. USA, 1999. 29p.

OrbiSAT. **A Tecnologia OrbiSAR RFP (radar para penetração em folhagem)**. Disponível em <[http://www.orbisat.com.br/novo/pages/sensoriamento\\_tecnologia.php](http://www.orbisat.com.br/novo/pages/sensoriamento_tecnologia.php)>. Acesso em 15 fev. 2010.

PARADELLA, W. R.; CECARELLI, I.C. F.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C. G.; COTTINI, C. P.; OKIDA, R. Produção de carta topográfica através da estereoscopia de alta resolução do RADARSAT-1 integrada com dados TM-LANDSAT 5: uma avaliação para terrenos planos na Floresta Nacional de Tapajós (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n.2, p. 99-110, 2003.

PARADELLA, W. R.; OLIVEIRA C.G.; CECARELLI, I. C. F.; COTTINI, C. P.; OKIDA, R. Operational use of RADARSAT-1 fine stereoscopy integrated with Landsat-5 thematic mapper data for cartographic application in the Brazilian Amazon. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 2, p. 139-148, 2005.

QUARZEDDINE, M. S. **Generation of digital terrain models using polarimetric SAR interferometry**. 2002. 64p, MSc Degree – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2002.

SICKLE, J. V. **GPS for land surveyors**. Chelsea, MI: Ann Arbor Press, Inc., 1996. 209p.

SILVA, N. N. **Amostragem probabilística**. São Paulo: EDUSP;1998.

SMALL, D.; NUESCH, D. Validation of height models from ERS interferometry. In: ESA WORKSHOP ON APPLICATIONS OF ERS SAR INTERFEROMETRY, 1996, Zürich, Switzerland. **Proceedings...** Zürich. 1996.

SMITH, L. C. Emerging applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in geomorphology and hydrology. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 92, n. 3, p. 385-398, 2002.

TOUTIN, T.; Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 228-240, Dec. 2002.

TOPCON POSITIONING SYSTEM INC (Topcon), **Manual de instruções** – estação total construção série CTS-3000. Livermore, CA, 2008. 192p. Manual.

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED (Trimble), **Trimble® 5700/5800 GPS Receiver** - user guide. Sunnyvale, CA, 2005. 208p. Manual.

UNITED STATES COAST GUARD (USCG). **Navigation center** – the navigation center of excellence. Alexandria. Disponível em: <<http://www.navcen.uscg.gov/navinfo/Gps/ActiveNanu.aspx>> Acesso em: 10 jun. 2010.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Norwood, MA: Artech House, 1981. v. 1, 456 p.

WU, X.; THIEL, K. H.; WEHR, A. The effects of different land covers on the accuracy of interferometric DEM. In: ESA WORKSHOP ON APPLICATIONS OF ERS SAR INTERFEROMETRY, 1996, Zürich, Switzerland. **Proceedings...** Zürich. 1996.

ZALOTI JUNIOR, O. D. Avaliação do modelo Digital do Terreno Extraído de Dados do SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Sao Jose dos Campos: INPE, 2007, p. 5043-5050.



# APÊNDICE A

## CADERNETA DE CAMPO

PROJETO	
DATA	
RESPONSÁVEL	
NOME DA ÁREA	

DESIGNAÇÃO DO PONTO	<b>001</b>	Lat: <b>0° 9' 20,52" S</b>	Long: <b>0° 9' 3,06" W</b>
AVALIAÇÃO	<input checked="" type="checkbox"/> PLANIMÉTRICA		
	<input type="checkbox"/> ALTIMÉTRICA		

IDENTIFICAÇÃO DO PONTO	<input type="checkbox"/> URBANO
	<input type="checkbox"/> RURAL
	<input type="checkbox"/> PONTO MATERIALIZADO
	<input type="checkbox"/> PONTO MONUMENTADO
	<input type="checkbox"/> NÃO MATERIALIZADO

CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	<input type="checkbox"/> CÉU CLARO
	<input type="checkbox"/> PRESENÇA DE CB
	<input type="checkbox"/> CHUVOSO
	<input type="checkbox"/> PARCIALMENTE ENCOBERTO
	<input type="checkbox"/> TOTALMENTE ENCOBERTO

DECLIVIDADE	CLASSES
	0 – 6%
	6 – 20%
	> 20%

PRÉ-CAMPO	CAMPO
<b>X</b>	

USO DO SOLO	FLORESTA
	REGENERAÇÃO
	PASTAGEM
	SOLO EXPOSTO
	ÁREA URBANA
	SOMBRA
	NUVEM
	OUTROS

	<input type="checkbox"/> NOVA – < 6 anos
	<input type="checkbox"/> INTERMEDIÁRIA – 6 a 12 anos
	<input type="checkbox"/> VELHA – 12 a 25 anos
	<input type="checkbox"/> MUITO VELHA – > 25 anos
	<b>X</b>

RECEPTOR	<input type="checkbox"/> BASE	Nr DE SÉRIE DO RECEPTOR:	
	<input type="checkbox"/> ROVER		ELEVAÇÃO (°)
ANTENA (ALTURA):	<input type="checkbox"/> INCLINADA - m		
	<input type="checkbox"/> VERTICAL - m		
MÉTODO DE MEDIÇÃO:	<input type="checkbox"/> ESTÁTICO		
	<input type="checkbox"/> CINEMÁTICO		
	<input type="checkbox"/> PÓS-PROCESSADO		
	<input type="checkbox"/> TEMPO REAL		
MEDIÇÃO:	INÍCIO:		
	FIM:		
PDOP :	VDOP:	HDOP:	

### COORDENADAS FINAIS

GEOGRÁFICAS:	Lat:			
	Long:			
UTM:	E:	N:	H:	

PONTO PARA MEDIÇÃO

PLAN

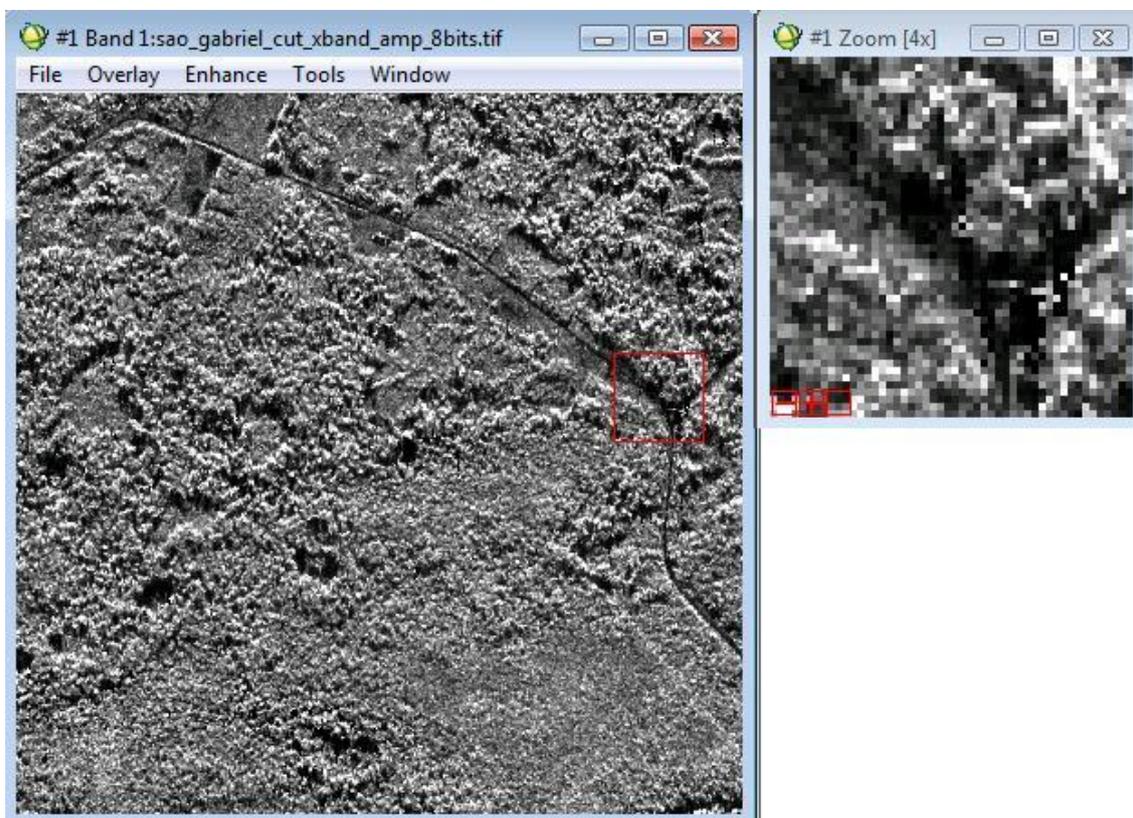
01

Localização nas imagens de alta resolução e radar (se possível):



Lat: **0° 9' 20,49" S**

Long: : **67° 0' 2,95" W**



Lat: : **0° 9' 20,52" S**

Long: : **0° 9' 3,06" W'**



CROQUI DO PONTO

↑N

DESCRIÇÃO DO PONTO

OBSERVAÇÃO



# APÊNDICE B

## ALGUNS TIPOS DE ESTRATOS

### P006 – Avaliação Planimétrica 006



### P010 – Avaliação Planimétrica 010



### P020b - Avaliação Planimétrica 020b



**P041 - Avaliação Planimétrica 041**



**PAu090 - Avaliação Planimétrica 090**



**AMoFl228 - Avaliação Altimétrica, Montanhoso, Floresta 228**



**AMoPa000 - Avaliação Altimétrica, Montanhoso, Pastagem 000**



**AOnRg079 - Avaliação Altimétrica, Ondulado, Regeneração 079**



**AOnFl051 - Avaliação Altimétrica, Ondulado, Floresta 051**



