



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15312-TDI/1357

**AVALIAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO
EXTRAÍDO DE DADOS SAR INTERFEROMÉTRICOS
NA BANDA X DO SAR R-99B**

Orlando Demétrio Zaloti Junior

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pela Dra. Corina da Costa Freitas

INPE
São José dos Campos
2007

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS,
Serviço de Informação e Documentação (INPE-SID)

Avaliação do modelo digital do terreno extraído de dados SAR interferométricos na banda X do SAR-R99B / Serviço de Informação e Documentação (INPE-SID) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. – São José dos Campos: INPE, 2007.

142p. – (INPE-15312-TDI/1357).

1. Modelo digital do terreno. 2. Radar de abertura sintética. 3. Interferometria. 4. SAR R-99B. 5. Avaliação cartográfica.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de **Mestre**
em **Sensoriamento Remoto**.

Dr. Camilo Daleles Renno

Presidente
INPE, SJCampos (SP)

Dra. Corina da Costa Freitas

Orientadora
INPE, SJCampos (SP)

Dr. David Fernandes

Membro da Banca – convidado –
ITA/CTA, SJCampos (SP)

Dr. Erivaldo Antonio da Silva

Membro da Banca – convidado –
UNESP, Presidente Prudente (SP)

Candidato: Orlando Demétrio Zaloti Junior

São José dos Campos, 12 de dezembro de 2007.

“A lembrança da vida da gente se guarda em trechos diversos, cada um com seu signo e sentimento, uns com os outros acho que nem não se misturam”.

JOÃO GUIMARÃES ROSA
em “Grande Sertão: Veredas”, 1956

A Deus, aos amigos invisíveis e a minha família ...

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Coronel Enio, ao Tenente-Coronel Lucca e ao Major Moreira pelo incentivo e pela oportunidade para a realização deste trabalho.

À minha querida esposa Fabia pelo apoio, compreensão e sacrifício sem a qual esta obra não seria possível...

Às queridas “mães” Judith, Maria e Lúcia que muito me auxiliaram com seus gestos de fé e amor.

À minha orientadora, a Dra. Corina pela oportunidade em orientar esta dissertação e pela generosidade no compartilhamento de seus vastos conhecimentos.

Ao meu co-orientador, Msc. Sidnei pelos conselhos oportunos e pelo rigor nas críticas construtivas.

Ao Coronel Darcton e ao Tenente-Coronel Máximo pelo apoio e confiança para a execução desta missão.

Ao Tenente-Coronel Veiga e ao Capitão Monteiro pelo apoio, pela espontânea voluntariedade em auxiliar nas tarefas de campo e escritório e pelas orientações esclarecedoras.

Ao Major Maurício pelo auxílio sempre fundamental para o cumprimento da tarefa.

Ao Tenente Froes pelo incansável prestatividade e companheirismo nas várias fases desta pesquisa.

Aos professores Camilo e Waldir pelas sugestões; Márcio, Mura e Paulão pelos importantes esclarecimentos.

Ao Gurgel pelo apoio e disponibilidade para o planejamento e a execução do levantamento de campo.

Aos amigos: Cléber pelos preciosos conselhos e incentivos; ao Ramon e ao Correia pelos oportunos socorros; ao Evandro, César, Tondin, Rui, Anderson, Rosana, Silvia, Diana, Etel, Angelucci e Fabiano pelo auxílio prestado.

Aos voluntários e companheiros do IEAv: Capitão Júlio, Roberto, Morgado, Leidi-

ane, Elcio, Suboficial Barros, Sargentos Mesquita e Cavalcante, imprescindíveis para este trabalho.

Aos Sargentos Boaventura e Carvalho do 2º/6º GAv pela atenção, dedicação e receptividade.

Aos amigos da Sensala: Alessandra, Joelma, Vantier, Ricardo, Erica, Flávia, Annette, Graziela, Thiago, Fernanda, Eliana pelo espírito de solidariedade.

Aos Soldados Castilho, Carlos, Maciel, Bustamante, Medeiros, Deolindo, Isaac, Rangel, Alves que se destacaram pelo empenho em uma das tarefas mais árduas.

Ao IEAv pela oportunidade e apoio logístico, ao 2º/6º GAv e a Prefeitura Municipal de São José dos Campos pelo fornecimento do material necessário a realização desta pesquisa.

RESUMO

No território brasileiro há muitas áreas não cobertas por cartas topográficas e as existentes encontram-se desatualizadas devido às contínuas alterações de uso e cobertura do solo. O Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) dispõe de aeronaves equipadas com radar de abertura sintética que permitem o imageamento em condições adversas. Este radar foi concebido para tarefas de reconhecimento, sob uma perspectiva civil e militar. O potencial deste sensor para fins cartográficos ainda não foi explorado. O objetivo desta dissertação é avaliar altimetricamente o modelo digital do terreno interferométrico fornecido pelo SIPAM. Para atingir este propósito, foi realizada uma investigação de possíveis fatores que afetam a qualidade do modelo obtido por interferometria, tais como o gradiente de declividade, o aspecto, as regiões da imagem na dimensão em alcance, os usos e coberturas do solo. A área de estudo, localizada no Município de São José dos Campos, Estado de São Paulo, Brasil foi dividida em regiões homogêneas (estratos), cujas características estavam associadas aos fatores que poderiam afetar a qualidade do modelo. As coletas de amostras nos estratos foram realizadas com o emprego de receptores GPS utilizando os métodos de posicionamento relativo (levantamento de pontos amostrados) e diferencial (levantamento de vias terrestres). O modelo digital do terreno apresentou erros planimétricos, tendo sido corrigido com as vias terrestres medidas como referência. O modelo digital do terreno corrigido foi classificado em relação às normas cartográficas vigentes, atendendo a escala de 1:100.000 (classe A) do Padrão de Exatidão Cartográfica, com a condição de que a tendência seja removida. Os erros do modelo digital do terreno corrigido apresentaram uma componente global de tendência, com um erro médio de -27,83 m. Os estratos apresentaram uma quantidade reduzida de pontos amostrados, sendo empregada a estatística não-paramétrica. Após a remoção da tendência, os erros dos estratos não apresentaram, em geral, diferenças significativas entre as regiões em alcance, nem entre os usos e coberturas do solo. O aspecto e o gradiente de declividade foram considerados fatores influentes nos erros. Os estratos montanhosos apresentam uma maior variabilidade, tendo o estrato montanhoso com aspectos frontal e anti-azimutal uma tendência a subestimar as altitudes. O estrato ondulado com aspectos dorsal e azimutal tende a superestimar as altitudes, com média variabilidade. O estrato formado pelo agrupamento do ondulado com aspectos frontal e anti-azimutal e do plano não apresenta tendência, com baixa variabilidade. O estrato montanhoso com aspectos dorsal e anti-azimutal apresenta alta variabilidade e tendência nula. Apesar do SAR R-99B apresentar uma alta resolução espacial no modo interferométrico (3 m), o modelo digital do terreno extraído não atendeu às escalas altimétricas maiores que 1:100.000 (classe A), resultado aquém do esperado, e apresentou um erro planimétrico de 178,297 m, o que inviabiliza a sua utilização em cartografia, caso não seja realizada previamente uma correção geométrica apropriada e a remoção da tendência.

EVALUATION OF DIGITAL TERRAIN MODEL EXTRACTED FROM SAR DATA IN X-BAND OF SAR R-99B

ABSTRACT

In the Brazilian territory there are several areas with no topographic mapping coverage and the existent maps are not updated due to the continuous land use and land cover changes. The Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) uses airplanes with synthetic aperture radar which allows to image in several conditions. This radar was designed for reconnaissance tasks with a civil and military perspective. The potential of this sensor for mapping has not been studied yet. The purpose of this dissertation was to evaluate the elevations of the interferometric digital terrain model supplied by SIPAM. To reach this aim, it was analyzed the possible factors which affect the quality of the model extracted by interferometry such as the slope gradient, the aspect, the regions of imagery in range dimension, the land use and land cover. The study site at São José dos Campos, state of São Paulo, Brazil was divided in homogeneous regions (strata) which features were related to the factors that would affect the quality of the model. The sample collection in the strata were done with the GPS receivers performing relative positioning (sample points survey) and differential GPS (road survey). The digital terrain model showed shift and rotation problems that were fixed using the surveyed roads as reference. The fixed digital terrain model was classified according to the Brazilian mapping standards as compatible at scale of 1:100.000 (class A) on condition that bias will be removed. The digital terrain model errors have bias, with a mean error of -27,83 m. The strata had a small number of samples being used the nonparametric statistics. After the removal of bias, the strata did not have significant differences at the regions of imagery in range dimension and at the land use and land cover, in general. The aspect and slope gradient were considered influential on errors. The mountain strata showed a larger variability and the mountain stratum with foreslope and anti-azimuthal aspects tend to underestimate the errors. The undulated stratum with backslope and azimuthal aspects tend to overestimate the errors with intermediate variability. The stratum composed by grouping the undulated with foreslope and anti-azimuthal aspects and flat does not show bias and it has intermediate variability. Although the SAR R-99B has a high spatial resolution in interferometric mode (3 m), the digital terrain model extracted was not compatible with scales higher than 1:100.000 (class A), with a result worse than the expected and had a planimetric error of 178,297 m that does not allow its use for mapping unless it is applied first an appropriate geometric correction and bias removal.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	25
1.1 - Contextualização	25
1.2 - Objetivos	26
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 - Princípios de Radar Imageador	29
2.1.1 - Fundamentos	29
2.1.2 - Geometria de aquisição	30
2.1.3 - Distorções Geométricas em Imagens de Radar	31
2.2 - Interferometria e Geocodificação	32
2.3 - Modelagem do Terreno	35
2.3.1 - Gradiente de Declividade e Aspecto	37
2.4 - Características dos Alvos que Influenciam a Qualidade do MDT Interferométrico	38
2.5 - Levantamento Topográfico Planialtimétrico com Sistema de Posicionamento Global	40
2.5.1 - Fundamentos	40
2.5.2 - Fontes de Erros	41
2.5.3 - Técnicas de Posicionamento	42
2.6 - Padrões para Avaliação Cartográfica do MDT	44
2.6.1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC	44
2.6.2 - <i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i> - NSSDA	45
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODO	47
3.1 - Definição da Área de Estudo	48
3.2 - Materiais	49

3.3 - Método	51
3.3.1 - Aerolevanteamento InSAR	51
3.3.2 - Processamento interferométrico	51
3.3.3 - Estratificação da área de estudo	54
3.3.4 - Amostragem	60
3.3.5 - Levantamento de campo	61
3.4 - Análise dos Dados	68
3.4.1 - Análise Qualitativa	68
3.4.2 - Análise Quantitativa	70
3.4.3 - Avaliação Cartográfica Tradicional	71
3.4.4 - Análise por Estratos	73
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	75
4.1 - Estratificação da Área de Estudo	75
4.2 - Correção Geométrica do MDT	75
4.3 - Análise Visual	81
4.4 - Detecção e Remoção de <i>Outliers</i>	85
4.5 - Avaliação Cartográfica Tradicional	88
4.6 - Análise de Regressão	90
4.7 - Análise por Estratos	94
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A - LISTAGEM DE ESTRATOS	125
APÊNDICE B - ALGUNS TIPOS DE USO/COBERTURA DO SOLO LEVANTADOS	131
APÊNDICE C - LEGENDA DA IMAGEM DOS ESTRATOS	137
APÊNDICE D - <i>BOX PLOTS</i> DOS ERROS DOS ESTRATOS COM MEDIANA COMO MEDIDA DA TENDÊNCIA CENTRAL E QUARTIS INFERIOR E SUPERIOR COMO COMPRIMENTO DO RETÂNGULO	139

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Geometria SAR.	30
2.2 Distorções geométricas em imagens de radar.	31
2.3 Processamento interferométrico e geocodificação.	33
2.4 Estruturas de rede de elevação.	37
2.5 Gradiente de declividade.	38
3.1 Etapas da metodologia.	47
3.2 Área de Estudo.	48
3.3 Aeronave R-99B com localização dos sensores na fuselagem.	52
3.4 MDT extraído do SAR R-99B sobre os limites do Município de São José dos Campos.	53
3.5 Modelo digital do terreno (IGC) do Município de São José dos Campos.	56
3.6 Vista superior de uma montanha iluminada pelo SAR.	57
3.7 Classes de regiões na dimensão em alcance sobre a faixa imageada.	59
3.8 Localização das estações de referência com respectivas áreas de cobertura.	62
3.9 Localização dos pontos GPS sobre o relevo sombreado do Município de São José dos Campos.	65
3.10 Traçado das vias terrestres levantadas por GPS sobre o relevo sombreado do Município de São José dos Campos.	67
3.11 Etapas da análise dos dados.	69

4.1	Mapa de classes de gradiente de declividade da área de estudo.	76
4.2	Mapa de classes de aspecto da área de estudo.	77
4.3	Mapa de classes de uso/cobertura do solo da área de estudo.	78
4.4	Mapa de estratos da área de estudo.	79
4.5	MDT original (esquerda) e corrigido (direita) com levantamento DGPS (linha preta). Escala aproximada de 1:35.000.	81
4.6	Relevo sombreado da planície do Rio Paraíba do Sul.	82
4.7	Relevo sombreado da várzea do Rio Paraíba do Sul com o talude da ferrovia (seta amarela), lago (seta branca) e o Rio Paraíba do Sul (seta vermelha).	83
4.8	Relevo sombreado da Serra da Mantiqueira.	84
4.9	“Ilha”no MDT (acima) e na imagem sombreada (abaixo).	84
4.10	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos no alcance próximo.	85
4.11	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos no alcance distante.	86
4.12	Pontos E00516 (esquerda) e E05917 (direita) sendo levantados.	87
4.13	Histograma dos erros com resultado do teste Shapiro-Wilk para o MDT corrigido.	89
4.14	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT original com as retas de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.	91
4.15	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT corrigido com a reta de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.	91
4.16	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT original, após a remoção da tendência, com as retas de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.	93

4.17	Diagrama de dispersão das altitudes do MDT corrigido, após a remoção da tendência, com as retas de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.	94
4.18	Diagramas de dispersão dos erros do MDT corrigido da componente global da tendência para a categoria gradiente de declividade.	95
4.19	Diagramas de dispersão dos erros da categoria aspecto, corrigidos da componente global da tendência.	96
4.20	Diagramas de dispersão dos erros da categoria de uso/cobertura do solo, corrigidos da componente global da tendência.	97
4.21	Diagramas de dispersão dos erros da categoria de região da imagem na dimensão em alcance, corrigidos da componente global da tendência.	98
4.22	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.	99
4.23	<i>Box plots</i> dos erros absolutos dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.	101
4.24	Condições de levantamento em área urbana.	105
4.25	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.	107
4.26	<i>Box plots</i> dos erros absolutos dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.	108
4.27	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos agrupados.	111
4.28	<i>Box plots</i> dos erros absolutos dos estratos agrupados.	111
4.29	Histograma dos erros dos estratos agrupados.	112
B.1	Levantamento em logradouro.	131
B.2	Levantamento em topo de edificação.	131

B.3	Levantamento em cultura de milho.	132
B.4	Levantamento em cultura de feijão.	132
B.5	Levantamento em cultura de arroz.	133
B.6	Levantamento em cultura de hortaliça.	133
B.7	Levantamento em cultura de mandioca.	134
B.8	Levantamento em capim baixo.	134
B.9	Levantamento em capim médio.	135
B.10	Levantamento em capim alto.	135
C.1	Legenda dos estratos no alcance próximo.	137
C.2	Legenda dos estratos no alcance distante.	138
D.1	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.	139
D.2	<i>Box plots</i> dos erros absolutos dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.	140
D.3	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.	140
D.4	<i>Box plots</i> dos erros absolutos dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.	141
D.5	<i>Box plots</i> dos erros dos estratos agrupados.	141
D.6	<i>Box plots</i> dos erros absolutos dos estratos agrupados.	142

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Faixas do microondas empregadas em radar.	30
2.2 Padrões de exatidão planimétrica.	45
2.3 Padrões de exatidão altimétrica.	45
2.4 Relação entre as escalas de mapeamento sistemático, eqüidistância (eq) e o erro-padrão do PEC.	45
3.1 Classes de gradiente de declividade.	54
3.2 Classes de gradiente de declividade empregadas.	54
3.3 Classes de aspecto empregadas.	57
3.4 Precisão dos receptores empregados.	62
3.5 Distribuição de pontos GPS por estrato.	66
4.1 <i>Outliers</i> detectados com o uso de <i>box plots</i>	86
4.2 Estatística descritiva por estrato após a remoção dos <i>outliers</i> detectados.	87
4.3 Pontos com valores de erros máximos e mínimos suspeitos.	88
4.4 Estatística descritiva e resultado da análise de tendência.	90
4.5 Resultados da regressão linear simples com valores- <i>p</i> dos coeficientes de regressão.	92
4.6 Intervalos de confiança simultâneos para β_0 e β_1 , baseados no procedimento de Bonferroni ($\alpha = 10\%$).	94
4.7 Estatística descritiva dos erros por estrato.	99

4.8	Estatística descritiva dos erros absolutos por estrato.	102
4.9	Valores- p do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos estratos nas regiões em alcance e nova nomenclatura adotada para os estratos agrupados.	103
4.10	Estatística descritiva dos erros por estrato sem a categoria de região na dimensão em alcance.	104
4.11	Valores do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos estratos de cultura, pastagem, área urbana no gradiente de declividade plano.	104
4.12	Valores do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos estratos de pastagem e de área urbana no gradiente de declividade ondulado.	105
4.13	Nova nomenclatura dos estratos sem a categoria de uso/cobertura do solo.	106
4.14	Estatística descritiva dos erros por estrato sem a categoria de uso/cobertura do solo.	106
4.15	Valores- p do teste Kolmogorov-Smirnov para os estratos sem uso/cobertura do solo.	106
4.16	Valores- p do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos erros das classes de aspecto nos gradientes de declividade ondulado e montanhoso .	109
4.17	Estatística descritiva dos estratos sem uso/ocupação do solo e valores- p do teste t para uma amostra usado na identificação dos estratos com erro médio igual a zero.	109
4.18	Composição dos estratos obtidos com agrupamento.	110
4.19	Estatística descritiva dos erros dos estratos agrupados.	110
4.20	Estatística descritiva dos erros absolutos dos estratos agrupados.	110
A.1	Descrição dos estratos com nomenclatura original.	125
A.2	Descrição dos estratos levantados com nomenclatura modificada.	129

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	–	Analysis of Variance
Aa	–	Anti-azimutal
Ad	–	Alcance distante
Ap	–	Alcance próximo
Au	–	Área urbana
Az	–	Azimutal
C	–	Cultura
C/A	–	Código civil (modulado em L1)
D	–	Dorsal
DEC	–	Denominador da escala da carta
DGPS	–	Differential Global Positioning System
Di	–	Distância
DoD	–	Department of Defense
DOP	–	Dilution of Precision
DP	–	Desvio-padrão
e	–	Erro
ENVI	–	Environment for Visualizing Images
EP	–	Erro-padrão
EP _{PEC}	–	Erro-padrão estabelecido pelo Padrão de Exatidão Cartográfica
eq	–	Eqüidistância
ERS-1	–	European Remote-Sensing Satellite
F	–	Frontal
GPS	–	Global Positioning System
GSP	–	Ground SAR Processor
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDL	–	Interactive Data Language
IGC	–	Instituto Geográfico e Cartográfico
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	–	Interferometric Synthetic Aperture Radar
L	–	Banda L do microondas
LIDAR	–	Light Detection and Ranging
L1	–	Frequência GPS (1575,42 MHz)
L2	–	Frequência GPS (1227,60 MHz)
L2C	–	Código civil (modulado em L2)
M	–	Montanhoso
MAXVER	–	Máxima Verossimilhança
MDS	–	Modelo Digital de Superfície
MDT	–	Modelo Digital do Terreno
MNE	–	Modelo Numérico de Elevação

MSS	– Multispectral Scanner System
n	– Número de pontos
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR-GPS	– Navigation Satellite with Time and Ranging - GPS
NSSDA	– National Standard for Spatial Data Accuracy
O	– Ondulado
OIS	– Optical-Infrared Sensor
P	– Código preciso
Pa	– Pastagem
PEC	– Padrão de Exatidão Cartográfica
Pl	– Plano
ppm	– Parte por milhão
reg	– Registrada
RMSE	– Root Mean Square Error
RTK	– Real Time Kinematic
SAR	– Synthetic Aperture Radar
SIPAM	– Sistema de Proteção da Amazônia
SRTM	– Shuttle Radar Topography Mission
TIN	– Triangulated Irregular Network
UTM	– Universal Transversa de Mercator
WGS-84	– World Geodetic Datum 1984
Y	– Código P criptografado

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Vastas áreas da região Amazônica sofrem mudanças significativas de uso e cobertura do solo em intervalos relativamente curtos, devido à intensa atividade antrópica. O uso desordenado do solo tem provocado danos irreparáveis ao complexo bioma tropical local, colocando em risco a biodiversidade existente e criando repercussões negativas ao Brasil, em relação ao cenário geopolítico internacional.

Além disso, a região abriga reservas minerais de grande valor econômico ainda não devidamente localizadas ou exploradas. Minérios preciosos, como o nióbio, de imprescindível valor para a indústria aeroespacial, são encontrados na Amazônia em quantidades tais, que tornam o Brasil um dos países com uma das maiores reservas deste elemento, o mesmo ocorrendo com vários outros minérios.

O governo tem executado vários planos no sentido de coibir práticas ilegais a fim de preservar o patrimônio amazônico. Nem todas estas políticas têm atingido o sucesso almejado. Um dos fatores que inviabilizam parcialmente estas ações é a falta de elementos para um planejamento público adequado às reais necessidades regionais.

A cartografia surge como um componente fundamental nas atividades de planejamento, fornecendo subsídios ao processo de decisão em políticas a serem adotadas pelo governo, no sentido de preservar e direcionar o processo de desenvolvimento sustentável da região. Um mapeamento desatualizado ou em escala inapropriada poderá gerar uma má compreensão do espaço geográfico, acarretando em ações inadequadas com possível dispêndio excessivo do erário público e a não consecução total dos objetivos propostos.

O Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) é um sistema de administração integrada das questões amazônicas, sendo formado por várias instituições governamentais e da sociedade civil. Foi concebido em uma orientação estratégica visando a manutenção da soberania e a proteção das riquezas naturais da região. Para o cumprimento de sua missão, o SIPAM dispõe de vários sensores de sensoriamento remoto embarcados em modelos específicos de aeronaves. Um destes modelos é o R-99B, que possui os seguintes sensores: o radar de abertura sintética (*Synthetic*

Aperture Radar - SAR) ou SAR R-99B, o imageador multiespectral (*Multispectral Scanner System* - MSS) e o sensor óptico-infravermelho (*Optical-Infrared Sensor* - OIS) de acordo com Almeida (2002).

O SAR R-99B surge como um potencial instrumento a ser empregado neste processo de mapeamento. É um sensor que está sendo utilizado pelo SIPAM em atividades de reconhecimento na região Norte do Brasil, uma área sujeita a condicionantes atmosféricas como nuvem, fumaça e bruma que muitas vezes inviabilizam a utilização de sensores ópticos. É um SAR aerotransportado que opera na faixa espectral de microondas, mais especificamente nas frequências L e X do espectro eletromagnético, com grande ângulo de visada e permite o levantamento no modo interferométrico (*Interferometric SAR* - InSAR) em apenas uma passagem com a banda X. Tem a capacidade de gerar imagens com a banda L nas quatro polarizações lineares (*Quad-Pol L band*) e também de gerar imagens na polarização HH com a banda X.

1.2 Objetivos

O potencial do SAR R-99B para aplicações cartográficas ainda não foi avaliado, assim como o modelo digital do terreno (MDT) fornecido pelo SIPAM. Este sensor tem a capacidade de gerar produtos altimétricos, que potencialmente poderiam atender a grande demanda existente. Faz-se necessário uma avaliação mais completa deste potencial, assim como das limitações presentes.

O objetivo geral deste trabalho consiste em uma avaliação altimétrica do MDT gerado pelo SAR R-99B, utilizando como dados de referência amostras coletadas em campo com o uso de receptores GPS. Para estas avaliações, a área de estudo é inicialmente dividida em estratos, considerando-se os fatores que podem influir no processo de extração do MDT (gradiente de declividade, aspecto, uso/cobertura do solo e regiões da imagem na dimensão em alcance), e, por conseguinte, na qualidade do produto final obtido. Em termos estatísticos, o estrato pode ser definido como uma parte de uma população com características homogêneas.

Os objetivos específicos consistem em:

- identificar possíveis problemas presentes no MDT gerado pelo SAR R-99B;
- realizar uma análise estatística dos erros obtidos em cada estrato, identificando os fatores que afetam a qualidade do MDT;

- classificar o MDT em conformidade com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), vigente no Brasil, a partir da avaliação da acurácia.

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos:

- o Capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos e a estruturação deste trabalho;
- no Capítulo 2 são encontrados os fundamentos teóricos dos conceitos empregados nesta dissertação;
- o Capítulo 3 descreve a área de estudo, os materiais utilizados e o método adotado;
- no Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos;
- o Capítulo 5 trata das conclusões extraídas do Capítulo 4 e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Alguns conceitos básicos referentes a este trabalho são descritos nos próximos tópicos, com o objetivo de dirimir possíveis dúvidas no emprego dos termos citados nos capítulos deste documento.

2.1 Princípios de Radar Imageador

2.1.1 Fundamentos

O termo Radar é um acrônimo significando “detecção de rádio e distância” (*RAdio Detection And Ranging* - Radar). Teve como origem os primeiros experimentos de Heinrich Hertz no século XIX. Houve um grande desenvolvimento deste instrumento durante a 2ª Guerra Mundial devido à sua poderosa capacidade de detecção de embarcações e aeronaves. O emprego no meio civil deu-se a partir de 1960, conforme Henderson e Lewis (1998).

O princípio de funcionamento do radar é baseado na geração de um pulso eletromagnético para cada transmissão, que é emitido por uma antena e se propaga até o alvo. Parte da energia transmitida pela antena de radar é retroespalhada pelo alvo, retornando ao sensor, sendo captado pela antena receptora e sendo registrados a intensidade e o tempo de retorno do sinal. O sinal é amplificado, demodulado e digitalizado, tendo como uma das possíveis saídas a estimativa de reflectividade (imagem) expressa em unidades de potência (Henderson e Lewis, 1998).

O radar atua dentro de bandas específicas na faixa de microondas no espectro eletromagnético (Tabela 2.1). Esta faixa corresponde a um intervalo de comprimento de onda variando aproximadamente entre 1 mm a 1 m (Ulaby *et al.*, 1981). Devido à dimensão do comprimento de onda, o radar não sofre a interferência dos elementos atmosféricos (com exceção da chuva para determinados comprimentos de onda), o que o torna propício para aplicações em regiões tropicais.

Cada banda possui características mais adequadas para determinados tipos de aplicação em detrimento de outras. Dutra *et al.* (2002) citam que a altura interferométrica, obtida com a diferença dos modelos interferométricos nas bandas P e X para a medição da altura de floresta tropical primária, se aproxima de medições

realizadas em campo. Na banda X, a onda eletromagnética é refletida ao atingir o topo da cobertura vegetal, enquanto na banda P ocorre uma penetrabilidade com potencial de atingir o solo da floresta. A diferença dos modelos de elevação gerada pelas duas bandas permitiria uma estimativa da altura do dossel.

TABELA 2.1 - Faixas do microondas empregadas em radar.

Banda	Faixa de Comprimento (cm)	Frequência (GHz)
K	1,1-1,67	26.500-18.000
X	2,4-3,75	12.500-8.000
C	3,75-7,5	8.000-4.000
S	7,5-15	4.000-2.000
L	15-30	2.000-1.000
P	30-100	1.000-300

FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000).

2.1.2 Geometria de aquisição

A [Figura 2.1](#) apresenta a geometria envolvida em um imageamento com radar.

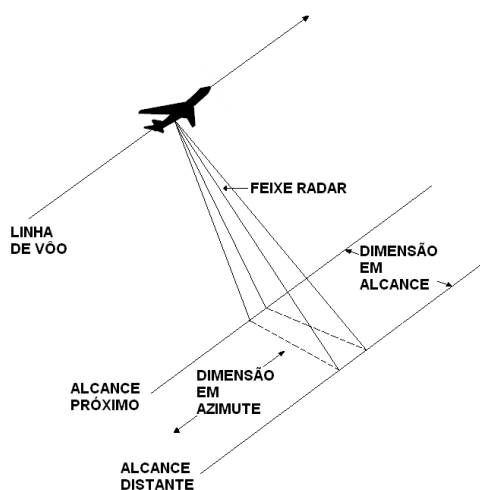


FIGURA 2.1 - Geometria SAR.

FONTE: Adaptado de Veiga e Sant'Anna (2002).

A dimensão na direção da linha de vôo (*along track*) ou longitudinal é denominada

azimute (*azimuth*) e a dimensão ortogonal ou transversal é denominada alcance (*range*). A região da imagem na qual inicialmente a frente de onda incide é denominada alcance próximo (*near range*), enquanto que a região mais afastada é denominada alcance distante (*far range*).

2.1.3 Distorções Geométricas em Imagens de Radar

Se a frente de onda atinge um alvo inclinado, que tenha uma inclinação maior que o ângulo de visada do radar (Figura 2.2), ocorrerá que o primeiro retorno (eco) será o do topo (ponto B) deste alvo (por estar mais próximo da antena). O eco da base do alvo ocorrerá posteriormente (ponto A). Isto causará na imagem uma distorção na qual o alvo aparecerá inclinado em direção da antena (segmento BA na imagem). Esta distorção é denominada inversão (*layover*) como pode ser observada na Figura 2.2 (Campbell, 1996).

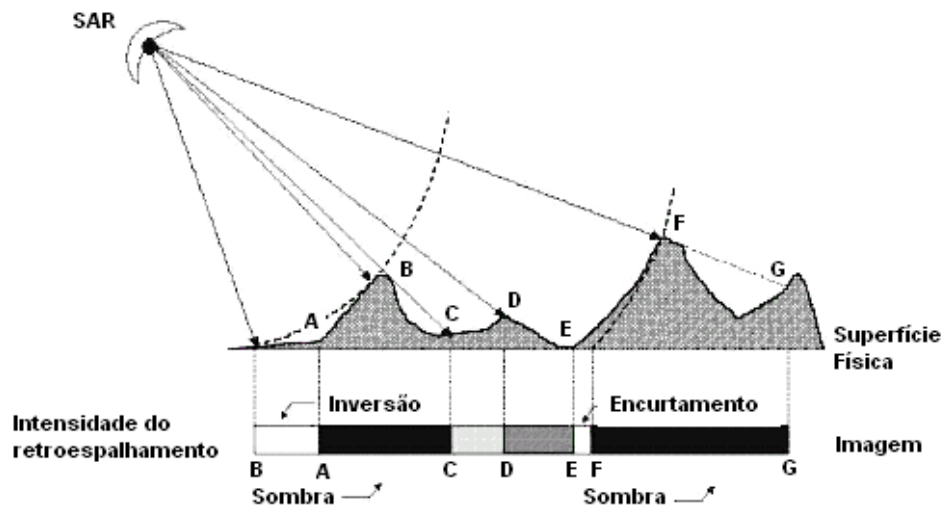


FIGURA 2.2 - Distorções geométricas em imagens de radar.
 FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000).

Outra distorção encontrada nas imagens de radar é o encurtamento de rampa (*fore-shortening*). Ocorre quando a inclinação da face do alvo iluminada pelo radar for menor que o ângulo de visada do radar, como ilustrado na Figura 2.2. Como a frente

de onda atinge primeiro a base (ponto E) e depois o topo (ponto F), o alvo aparecerá comprimido na imagem (segmento EF na imagem), com o topo muito próximo da base da face iluminada (Lillesand e Kiefer, 2000).

O sombreamento ocorre quando o sinal de radar não consegue iluminar a face dorsal do alvo (Figura 2.2). O retroespalhamento será fraco ou nulo, acarretando em falta de informação nessas regiões (segmentos AC e FG na imagem).

Há uma distorção geométrica denominada “deslocamento devido ao relevo” que é a distância entre a projeção da posição real do alvo e a projeção ortográfica no plano de referência, devido à variação na altitude do alvo. Diferentemente do sensor óptico, o deslocamento devido ao relevo no radar é maior, quanto mais próximo o alvo se encontra da fonte de transmissão.

2.2 Interferometria e Geocodificação

Madsen *et al.* (1995) citam que o emprego de radar em mapeamento teve início no final da década de 60, quando foi mostrado experimentalmente que o padrão de interferência entre os sinais recebidos por duas antenas SAR espacialmente separadas continha informações sobre o relevo. Madsen (1993), Zebker *et al.* (1994), Lin e Vesecky (1994) têm demonstrado o potencial da técnica interferométrica na produção de mapas topográficos de alta resolução, com erros inferiores a 5 m em altitude. Este potencial incentivou a execução do mapeamento topográfico global, denominado *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), realizado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em fevereiro de 2000 (Gelautz *et al.*, 2003).

O processamento interferométrico (*Interferometric SAR* - InSAR) e a geocodificação InSAR são especificados no fluxograma apresentado na Figura 2.3. A geocodificação InSAR é a etapa subsequente ao processamento interferométrico e tem por finalidade a geração da ortoimagem e do MDT a partir do resultado do processamento interferométrico.

Há dois modos de levantamento interferométrico para a aquisição do par de imagens SAR: a interferometria de uma passagem e a interferometria com duas passagens (Mura, 2000). O levantamento de uma passagem é normalmente adotado em sensores aerotransportados e se baseia no emprego de duas antenas posicionadas na mesma direção em azimute mas com um pequeno deslocamento. O levantamento com duas passagens é comumente utilizado em sensores orbitais, empregando uma antena para

receber o sinal retroespalhado em momentos diferentes (duas passagens orbitais distintas), conforme descrito por Henderson e Lewis (1998). O resultado desta etapa é um par de imagens complexas, formadas pelos pulsos recebidos por cada antena. As imagens complexas são então co-registradas com uma precisão melhor que 1/8 da dimensão linear do *pixel* (Gens, 1998).

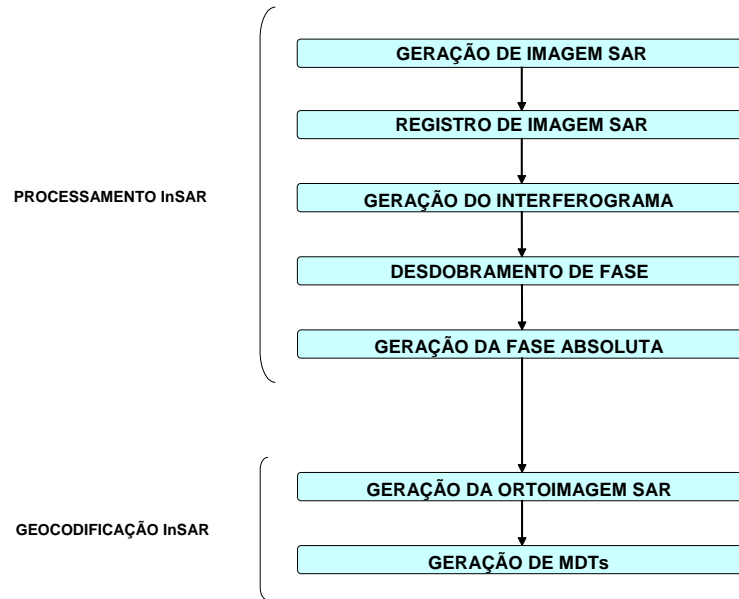


FIGURA 2.3 - Processamento interferométrico e geocodificação.
 FONTE: Adaptado de Mura (2000).

Com as imagens complexas co-registradas é possível gerar o interferograma. O interferograma é obtido pela diferença de fase entre duas imagens complexas que pode ser expressa através da [Equação 2.1](#), onde S_1 é uma imagem complexa e S_{2reg}^* (*reg* significa registrada) representa o complexo conjugado da outra imagem registrada. O interferograma contém os valores de diferença de fase para cada *pixel* de um conjunto de dados interferométricos de radar. As diferenças de fase no interferograma são representadas por franjas, pois a variação da fase é limitada entre 0 e 2π (Mura, 2000).

$$\Phi = \arctg(S_1 S_{2reg}^*) \quad (2.1)$$

Para avaliar o interferograma é gerado o mapa de coerência (ou imagem coerência). A coerência é estimada através da [Equação 2.2](#); representa o grau de correlação entre

o par de imagens complexas, e

$$\gamma = \frac{|\langle S_1 S_{2reg}^* \rangle|}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_{2reg} S_{2reg}^* \rangle}} \quad (2.2)$$

onde $\langle \rangle$ é a média amostral; $||$ é o módulo ou valor absoluto; $*$ é o complexo conjugado da imagem complexa.

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 a linha de base, menor será a coerência);
- co-registro de baixa qualidade.

O interferograma original apresenta ruídos oriundos da descorrelação espacial (causado por sombras), da descorrelação temporal (intervalos longos entre as passagens), do sistema, etc. Normalmente é aplicada uma filtragem no interferograma (como por exemplo, um filtro espacial de média) a fim de minimizar estes ruídos no interferograma original.

O desdobramento da fase é a próxima etapa do processamento InSAR (Figura 2.3). A informação da fase está diretamente relacionada à topografia. Porém, existe um problema no cálculo correto do número inteiro de ciclos da fase, que precisam ser adicionados para cada medida de fase, para se obter a correta distância na direção de visada do radar (*slant range*). Esta solução da ambigüidade é denominada desdobramento da fase. É uma operação realizada no domínio da frequência. Quando as franjas são densas (devido à distorção na imagem SAR causadas por sombreamento, encurtamento de rampa e inversão), os resultados dos métodos de desdobramento de fase não são satisfatórios.

Após o desdobramento da fase, é necessário realizar o cálculo da fase absoluta, que

consiste em adicionar uma constante ao valor da fase obtida. Isto ocorre porque os algoritmos de desdobramento de fase são baseados em métodos numéricos de integração, que produzem uma constante (*offset* da fase interferométrica) ao final do processo. O resultado é a obtenção da fase interferométrica absoluta, que é necessária à geração do MDT. É preciso pelo menos um ponto conhecido no terreno para recuperar a fase absoluta e calcular o valor da constante.

Após o término das fases do processamento InSAR, se inicia a geocodificação InSAR, como descrito na [Figura 2.3](#). A geocodificação InSAR é a geração da ortoimagem SAR sobre uma grade, representada em um sistema de projeção cartográfica, sem as distorções geométricas próprias de um sistema de radar de visada lateral. É baseada nas equações de *range-Doppler* para as duas antenas SAR, onde as coordenadas de um ponto no espaço são calculadas a partir da medida de distância alvo-radar e da variação da frequência *Doppler* do ponto. Baseado nas transformações de sistemas de referência, o ponto pode ser posicionado (coordenadas planas) e associado a um elipsóide de referência. Desta forma, todos os pontos da imagem podem ser transformados, obtendo-se uma ortoimagem e um MDT georreferenciado.

A qualidade do processo de geocodificação SAR está relacionada com o conhecimento preciso do vetor de estado da antena. O vetor de estado contém os dados de posição, velocidade e atitude da plataforma durante o imageamento. No caso dos radares orbitais, o vetor de estado da antena é obtido a partir de amostras dos dados do sistema de navegação dos satélites. Nos aerotransportados, o vetor de estado da antena é obtido da plataforma inercial (INS) e de dados de posicionamento do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), garantindo uma melhor acurácia do vetor de estado (Mura, 2000).

2.3 Modelagem do Terreno

De acordo com Pike (2002), a modelagem do terreno pode ser definida como uma técnica de quantificação da superfície física, sendo também denominada geomorfologia quantitativa, análise de terreno ou geomorfometria. O modelo digital do terreno (MDT) é atualmente um dos mais importantes dados usados para a análise geográfica, sendo uma representação computacional discreta de uma superfície contínua (Sant'Anna e Freitas, 2005). A criação de um MDT é o resultado de aquisição e interpolação de uma amostra de pontos para representar o terreno (Mercer *et al.*, 1998).

Não há uma padronização para a definição do termo mais adequado ao modelo para a representação da elevação. Santos e Tommaselli (2002) adotam o termo Modelo Digital do Terreno (MDT) para a representação que utiliza apenas as elevações de pontos localizados sobre o terreno e Modelo Numérico de Elevação (MNE) como sendo aquele que contém as elevações sobre a vegetação, edificações e o próprio terreno. Dutra *et al.* (2002) empregam a nomenclatura Modelo Digital de Elevação (MDE) para a representação do terreno e Modelo Digital de Superfície (MDS) para a representação de qualquer tipo de cobertura. Moura (2005) utiliza MDS para a representação da cobertura e MDT para a representação do terreno. Será adotado o termo MDT para a representação do topo das superfícies, objeto de estudo desta dissertação, considerando-se a baixa penetrabilidade do sinal da banda X nos alvos.

De acordo com Felgueiras e Erthal (1988), o MDT é 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. Para Wilson e Gallant (2000), os dados de elevação digital podem ser organizados em três tipos básicos de estruturas:

- grades regulares - é um modelo digital (Figura 2.4(a)) que representa superfícies através de um poliedro de faces retangulares (Câmara *et al.*, 2001);
- redes de triângulos irregulares - a representação por rede de triângulos irregulares (*triangulated irregular network* - TIN) ou malha triangular (Figura 2.4(b)) é formada por facetas com formas triangulares, cujos vértices são os pontos amostrais adjacentes, normalmente construídos por triangulação de Delauney;
- curvas de nível - a representação por curvas de nível (Figura 2.4(c)) divide o terreno em pequenos polígonos irregulares, formados por curvas de nível e linhas ortogonais.

Há várias maneiras de se produzir um MDT. A mais comum é aquela obtida pela digitalização das curvas de nível de uma carta topográfica por meio de uma mesa digitalizadora ou por vetorização semi-automática. Porém curvas de nível são apenas modelos com fidelidade variável da topografia, assim como os MDTs são modelos imperfeitos de curvas de nível (Ollier, 1967). Os métodos de produção de MDT que não utilizam as curvas de nível como fonte de dados, podem ter MDTs extraídos

com melhor qualidade (Pike, 2002). Um método muito comum é a extração do MDT durante o processo de restituição aerofotogramétrica (Robinson *et al.*, 1995). Com o advento das tecnologias de sensoriamento remoto, em especial do SAR, novas metodologias têm sido desenvolvidas. O método interferométrico atinge um grau de acurácia comparável ao obtido com a fotogrametria (Smith, 2002).

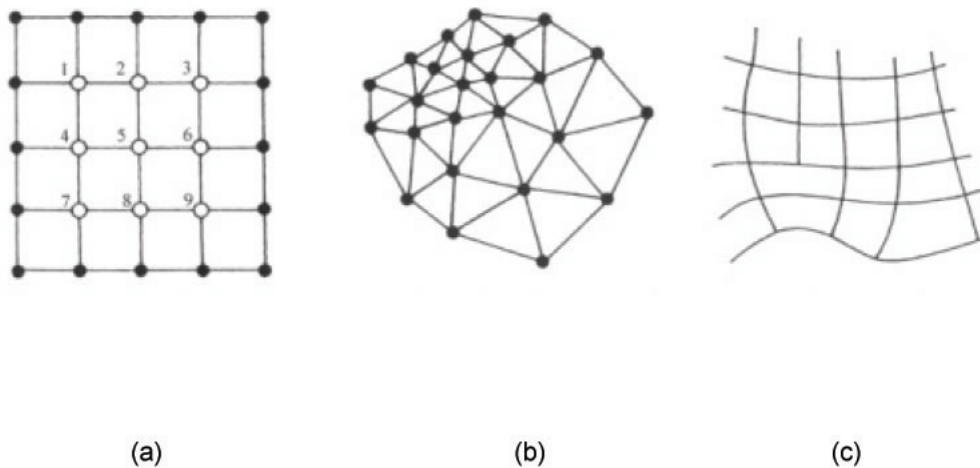


FIGURA 2.4 - Estruturas de rede de elevação.
FONTE: Adaptado de Wilson e Gallant (2000).

2.3.1 Gradiente de Declividade e Aspecto

A declividade é uma das mais importantes características do relevo, pois está relacionada à ação da força gravitacional. A gravidade faz com que a água escoe pela linha de maior declive, que é a linha perpendicular às curvas de nível. Isto permite a delimitação de bacias de drenagem e a simulação de escoamento de precipitação pluvial.

A declividade é formada por uma componente vertical, denominada gradiente de declividade e uma componente horizontal, denominada aspecto ou orientação de vertente. O gradiente de declividade em um ponto é a inclinação em relação ao horizonte (Figura 2.5), do plano tangencial à superfície do terreno naquele ponto. A tangente da declividade é a primeira derivativa da altitude, ou seja, a taxa de variação da altitude com a distância. É medida em graus ou porcentagem. O aspecto (ou orientação de vertente) é a direção horizontal da declividade, sendo medido em

graus no sentido horário a partir do norte (Chorley, 1972).



FIGURA 2.5 - Gradiente de declividade.

De acordo com Bernhardsen (2002), o gradiente de declividade e o aspecto podem ser determinados a partir de um MDT. O gradiente de declividade pode ser obtido neste modelo matricial por meio de uma operação com uma janela móvel. Com base nos valores das células contidas nesta janela, o gradiente de declividade pode ser calculado de várias maneiras. O método mais usual 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. Outra maneira, consiste em utilizar o valor médio da diferença entre o valor de cada célula e a célula central. O aspecto também é determinado por meio de uma janela móvel, sendo o resultado do aspecto da célula central determinado como a direção do maior valor do gradiente de declividade. Também pode ser determinado por ajuste de um modelo bilinear ou bicúbico.

2.4 Características dos Alvos que Influenciam a Qualidade do MDT Interferométrico

Os fatores que podem afetar o processamento interferométrico estão associados às características do sistema, do alvo e do processamento. Os fatores relacionados ao sistema estão associados ao vetor de estado, ao ruído do receptor do radar, à decorrelação temporal e espacial. Quanto ao processamento, se referem às características do algoritmo utilizado no processamento, à qualidade do co-registro e do desdobramento da fase (influenciada pelas distorções em imagens radar). Os fatores associados ao alvo são a declividade do terreno e a mobilidade do alvo (alvos em movimento

durante o imageamento produzem valores baixos de coerência).

Madsen *et al.* (1995) avaliaram MDTs obtidos a partir de dados do SAR aerotransportado NASA DC-8 com a banda C, considerando dois tipos de terrenos: plano e montanhoso. Foram detectados erros médios quadráticos de 2,2 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 50 cm 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). Diferentes coberturas de solo possuem diferentes propriedades e reflectividade, o que resulta em diferentes desempenhos de coerência. Valores crescentes de coerência e acurácia foram encontrados, respectivamente, para floresta, área urbana, área rural e refletores de canto. Small e Nüesch (1996) e Gelautz *et al.* (2003) também identificaram valores baixos de coerência para florestas para a banda C, 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, gradientes de declividade (0-2°, 2-4°, 4-6°, 6-8°, 8-10°) e 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 à declividade.

Outra comparação entre MDTs gerados por SAR (bandas X e P) e LIDAR aerotransportados foi realizada por Norheim *et al.* (2002). As acurácias dos MDTs foram avaliadas em relação a pontos de controle localizados em diferentes tipos de uso e cobertura de solo (solo exposto; áreas de alta e média densidade populacional; florestas de coníferas e mistas; gramado; brejo; vegetação arbustiva; lago e rio). Também foi utilizado um MDT obtido a partir de uma carta na escala de 1:24.000 (equidistância entre as curvas de nível de 6 m) para gerar as derivativas de terreno, a fim de serem confrontadas com os MDTs. Os dados SAR tenderam a superestimar as altitudes em aspecto norte. As classes floresta e vegetação arbustiva apresentaram maior erro.

Ludwig e Schneider (2006) avaliaram o MDT extraído do SRTM na banda X, sendo empregados pontos de controle, perfis altimétricos e subtração de imagens na avaliação. O MDT SRTM foi analisado quanto ao aspecto (norte, nordeste, este, sudeste, sul, sudoeste, oeste, noroeste e sem aspecto), declividade (intervalos de 1°), ângulo de incidência local (intervalos de 1°) e uso do solo (áreas urbanas, agricultura, floresta, vegetação arbustiva, áreas abertas, brejos e corpos d'água). O estudo conclui que o MDT do SRTM superestima a altitude em relevos movimentados e subestima em relevos planos; o erro aumenta com a declividade; o aspecto apresenta erros menores em sudeste e maiores no quadrante oposto. Não foi encontrada uma relação significativa entre uso do solo e a acurácia do MDT SRTM, apesar de não terem sido realizados testes estatísticos que validassem esta afirmação.

Toutin (2002) também realizou uma análise do impacto das derivativas de terreno (declividade e aspecto) na acurácia de MDTs obtidos por radargrametria, com o Radarsat-1 (banda C). Foram utilizadas áreas com relevos variando de plano a escarpado. A partir de MDTs de referência obtidos de cartas com equidistância de 10 m, foram extraídos os modelos de declividade com classes de 5° e modelos de aspecto com 24 classes de 15°. Posteriormente, as classes de aspecto foram reduzidas a quatro quadrantes: *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 resultado ocorreram para o *foreslope* e *backslope*, respectivamente. Para declives mais acentuados, maior foi a correlação entre a acurácia obtida na elevação e no aspecto.

2.5 Levantamento Topográfico Planialtimétrico com Sistema de Posicionamento Global

2.5.1 Fundamentos

O GPS ou NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite with Timing and Ranging - GPS*) é um sistema de posicionamento com cobertura global, operando continuamente com o propósito de fornecer a posição, a velocidade e o tempo de maneira precisa, em qualquer local da Terra e em qualquer condição climática. Foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*Department of Defense - DoD*).

O Sistema é formado por três segmentos: o espacial que é composto pelos satélites e pelos sinais gerados; o segmento de controle, responsável pelo controle e monitoramento, sendo composto por várias estações terrestres espalhadas na superfície terrestre e o segmento dos usuários que é dividido em usuário militar norte-americano (e o pessoal autorizado pelo DoD) e usuário civil, compreendendo este último a imensa comunidade internacional.

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° em relação ao plano do equador), permitindo uma abrangência global. Os satélites estão na quarta geração de desenvolvimento, cuja principal característica é a introdução do novo sinal L2C. Atualmente há 31 satélites GPS em órbita (USCG, 2007).

Há duas frequências sendo empregadas pelo GPS, ambas localizadas na banda L da região do microondas: L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz). Estas frequências são moduladas pelos códigos de acesso livre (C/A), preciso (P) que quando criptografado é denominado Y, mensagem de navegação e civil (L2C). O novo código L2C garantirá resultados mais robustos em ambiente com obstruções, por ser um sinal emitido com maior potência (Fontana *et al.*, 2001).

De acordo com Sickle (1996), o posicionamento com o GPS é realizado por duas grandezas (observáveis) distintas na determinação da distância entre os satélites e a antena do receptor. A mais simples, denominada pseudodistância (*pseudorange*), utiliza os códigos P, C/A ou L2C. É baseada na observação do intervalo de tempo de deslocamento do sinal, entre a emissão pelo satélite sendo rastreado, até a recepção na antena do receptor. Como a posição do satélite é conhecida pelo Segmento de Controle, e esta informação está codificada no sinal enviado, é possível posicionar tridimensionalmente a antena com um mínimo de quatro satélites por trilateração espacial. A segunda grandeza observável é a fase da onda portadora L1 ou L2, permitindo atingir o melhor nível de precisão possível com o GPS. A distância é determinada pelo cômputo de número inteiro de ciclos (ambigüidade) e da parte fracionária entre o satélite e a antena do receptor (Monico, 2000).

2.5.2 Fontes de Erros

Há vários tipos de erros influenciando os resultados fornecidos pelo GPS. Existem os erros oriundos de informações não precisas de posicionamento do satélite na órbita

especificada (presentes nas efemérides transmitidas). São significativos os atrasos do sinal por este atravessar várias camadas atmosféricas (ionosfera e troposfera) até ser recebido pela antena do receptor. O multicaminho (*multipath*) é uma fonte de erro muito comum, principalmente em ambientes urbanos e florestas; ocorre quando o sinal não se propaga diretamente à antena, sendo refletido por superfícies próximas.

Um dos itens relevantes ao se realizar medições com o GPS, é a disposição geométrica dos satélites sendo rastreados em relação à posição ocupada pela antena do receptor. O inverso do volume formado pelo tetraedro cujos vértices são determinados pelos quatro satélites mais distanciados, gera uma quantidade denominada diluição da precisão (*dilution of precision* - DOP). Quanto maior o valor do DOP, pior será a qualidade das observações. Cabe ressaltar que como os satélites GPS não são estacionários, normalmente haverá períodos mais favoráveis para o levantamento em áreas com obstruções físicas.

2.5.3 Técnicas de Posicionamento

Existem três técnicas de posicionamento com a utilização das observáveis GPS. O posicionamento absoluto é aquele para o qual o GPS foi originalmente projetado, sendo utilizado apenas um receptor e a observação da pseudodistância na determinação da posição. A segunda técnica é o posicionamento diferencial (*Differential GPS* - DGPS), que também utiliza a pseudodistância, porém com dois receptores, um fixo denominado base e outro itinerante denominado móvel. E o terceiro tipo de posicionamento é o relativo (ou interferométrico), que realiza observações da fase da onda portadora com dois receptores (Beraldo e 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 é normalmente empregado em navegação ou em medições rápidas com precisão grosseira. Por empregar apenas um receptor, é o mais simples de uso e também o menos dispendioso. A precisão horizontal atingida neste posicionamento é normalmente superior a 15 m em condições adequadas.

O posicionamento relativo é dividido em três métodos: o estático, o cinemático e o dinâmico. Este tipo de posicionamento tem como resultado um vetor com origem no ponto base e a outra extremidade sendo o ponto de interesse. Apesar de terem a mesma configuração básica e os mais altos níveis de precisão, estes métodos possuem aplicações distintas e receptores com *hardware* específicos, acarretando em uma ampla gama de produtos disponíveis no mercado.

O método estático 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 ambigüidades. É o método mais preciso, permitindo se alcançar precisões milimétricas em determinadas condições. Tem um alcance de até 100 km de raio entre o receptor base e o remoto, para receptores de uma frequência. É muito empregado em levantamento de redes geodésicas, monitoramento de placas tectônicas (geofísica) e controle de deformação de estruturas de engenharia.

O método cinemático utiliza apenas um receptor permanentemente fixo durante a sessão de levantamento (denominado base ou estação de referência) 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 ambigüidade (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. Tem um alcance de até 10 km de raio entre o receptor base e o móvel para receptores de uma frequência. É normalmente utilizado em levantamentos planialtimétricos em áreas sem obstruções.

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 receptor móvel ao receber as correções em tempo real, obtém coordenadas corrigidas no campo, permitindo a realização de medições baseadas em navegação precisa (nível centimétrico) como locação topográfica ou o posicionamento de peças de engenharia em áreas costeiras (*offshore*) com alta precisão. Exige a utilização dos receptores mais avançados disponíveis no mercado.

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 van-

tagem 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.

2.6 Padrões para Avaliação Cartográfica do MDT

Há vários padrões para a avaliação quantitativa de produtos cartográficos e cada país adota algum tipo específico às suas necessidades. Neste trabalho são descritos os padrões brasileiro (Padrão de Exatidão Cartográfica) e o norte-americano (*National Standard for Spatial Data Accuracy*).

Alguns termos são usados nestes padrões para descrever a qualidade das medições. A acurácia ou exatidão se refere à proximidade entre as observações de uma variável aleatória e o valor esperado. Quanto mais distante a observação está do valor esperado, menor será a sua acurácia. A precisão mede o grau de aderência entre as observações de uma variável aleatória. Se as observações estão agrupadas, com pouca dispersão, estas observações possuem alta precisão.

As observações podem ter alta acurácia, mas ter baixa precisão se estiverem bem distribuídas em relação ao valor esperado, mas com grande dispersão. Alta acurácia e precisão são obtidas quando as observações estão muito agrupadas ao redor do valor esperado (Anderson, 1998).

2.6.1 Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC

O PEC está inserido no Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. De acordo com o PEC, através da estimativa estatística dos dados amostrais (desvio-padrão amostral), é possível classificar qualquer produto cartográfico. É importante ressaltar, que o erro-padrão (EP), o desvio-padrão (DP) e o erro médio quadrático (RMSE) são considerados equivalentes no PEC (CONCAR, 2007). No PEC não se faz referência ao tamanho da amostra na avaliação de produtos cartográficos.

No PEC é estabelecido 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, como apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3. O EP_{PEC} é o erro-padrão máximo aceito para determinada escala.

TABELA 2.2 - Padrões de exatidão planimétrica.

Classe	PEC	EP_{PEC}
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	EP_{PEC}
A	1/2 eq	1/3 eq
B	3/5 eq	2/5 eq
C	3/4 eq	1/2 eq

Para se determinar a equidistância relativa a cada escala empregada no mapeamento sistemático brasileiro, é necessário utilizar a Tabela 2.4 adotada pelo IBGE.

TABELA 2.4 - Relação entre as escalas de mapeamento sistemático, equidistância (eq) e o erro-padrão do PEC.

Escala	Eqüidistância (m)	$EP_{PEC}(m)$
25.000	10	3,333
50.000	20	6,667
100.000	50	16,667
250.000	100	33,333
1.000.000	100	33,333

Por exemplo, um MDT com erro-padrão de 14,628 m é compatível com a classe A do PEC 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).

2.6.2 National Standard for Spatial Data Accuracy - NSSDA

O NSSDA é um padrão cartográfico utilizado nos Estados Unidos, 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 que são requeridos pelo menos 20 pontos para realizar uma avali-

ação da acurácia estatisticamente significativa, independente do tamanho da área avaliada. Esta quantidade permite uma determinação razoável com um nível de confiança de 95% (NSSDA, 1999).

Dentre várias considerações, o NSSDA recomenda que o conjunto de pontos de teste deve ter pelo menos 3 vezes a acurácia do produto testado. Estes pontos devem estar bem distribuídos por toda a área, com pelo menos 20% alocados em cada quadrante.

A medida de acurácia vertical absoluta é baseada no erro médio quadrático ou RMSE (*root mean square error* - RMSE). O RMSE é calculado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{MDT} - Z_{GPS})^2}{n}} \quad (2.3)$$

onde Z_{MDT} é a altitude no MDT, Z_{GPS} é a altitude GPS correspondente, n é o número de pontos utilizados na avaliação e i é o i -ésimo ponto.

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 metros de acurácia vertical a 95% de nível de confiança.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo descreve as características da área de estudo, apresenta os materiais empregados e relata o método utilizado para alcançar os objetivos propostos. O método empregado neste trabalho foi desenvolvido de acordo com o fluxograma apresentado na [Figura 3.1](#). Cada um dos componentes deste fluxograma são explicados no decorrer deste Capítulo.



FIGURA 3.1 - Etapas da metodologia.

3.1 Definição da Área de Estudo

A área de interesse está inserida no município de São José dos Campos, Estado de São Paulo (Figura 3.2). O Município está localizado na região do Vale do Paraíba, um importante pólo industrial e centro científico-tecnológico no segmento aeroespacial brasileiro. O Município possui uma área de 1099,60 km² e a área de interesse possui aproximadamente 748,84 km². A área de estudo corresponde à interseção da cena imageada pelo SAR R-99B e o município de São José dos Campos.

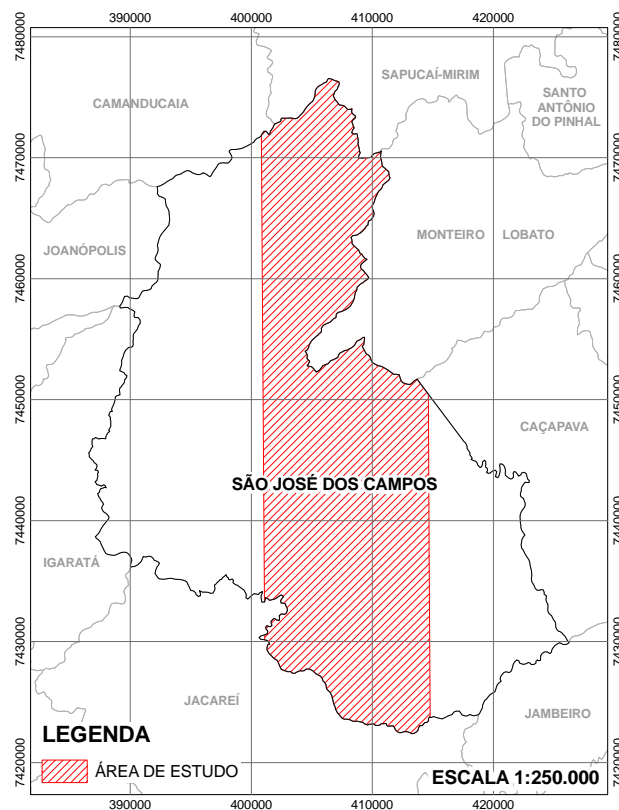


FIGURA 3.2 - Área de Estudo.

Geomorfologicamente está situada nas unidades morfoestruturais do Cinturão Orogênico do Atlântico (morfoescultura Planalto Atlântico) e da Bacia Sedimentar Cenozóica (morfoescultura Depressão do Médio Ribeira), segundo o mapeamento realizado por Ross e Moroz (1997). O relevo é formado pelos Morros da Serra do Mar, a transição dos morros cristalinos desta Serra, até as Colinas Tabuliformes

(terraços fluviais) e destas até a Várzea do Rio Paraíba do Sul e, novamente a passagem por colinas e morros até encontrar as Escarpas da Serra da Mantiqueira (Morelli *et al.*, 2003). Os tipos de solos presentes são os gleissolos melânicos ao longo do Rio Paraíba do Sul e argissolos e latossolos vermelho-amarelos ocupando o restante do Município (Oliveira *et al.*, 1999).

A atividade agrícola é realizada nas várzeas dos rios Paraíba do Sul e Jaguari, em torno do perímetro urbano, e nos Distritos de São Francisco Xavier e Eugênio de Melo. São cultivados feijão, batata inglesa e arroz irrigado. Em menor escala são produzidos milho para silagem, cana-de-açúcar, legumes e hortaliças. A silvicultura também é praticada no Município (IBGE, 2006).

A vegetação remanescente é formada pela Floresta Ombrófila Densa Montana e Alto-Montana e pela Floresta Ombrófila Mista nas escarpas da Serra da Mantiqueira, a Floresta Estacional Semidecidual Montana, nos morros da Serra do Mar e da Mantiqueira, a Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, nas várzeas do Rio Paraíba do Sul e de seus afluentes e enclaves típicos de Savana Arbórea Aberta nas colinas tabuliformes, como descrito por Morelli *et al.* (2003).

A justificativa para a escolha do município de São José dos Campos é a diversidade de relevo existente, vastas áreas de pastagens e campos (permitindo a avaliação do MDT), facilidade de apoio logístico (proximidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial) para a realização dos trabalhos de campo e se tratar de uma nova área de testes passível de ser utilizada para futuros experimentos. Além disso, sua localização transversal em relação ao Vale do Paraíba, propicia uma alta heterogeneidade física, ambiental e biológica (Morelli *et al.*, 2003).

3.2 Materiais

As diversas referências espaciais relativas à área de estudo foram organizadas em planos de informação de um banco de dados geográficos. Para isto, os dados foram compatibilizados em um sistema de referência único. Foi adotado o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o datum WGS-84. Para a criação deste banco de dados e a execução das etapas posteriores, foram utilizados os seguintes materiais:

- MDT interferométrico na banda X obtido com o sensor SAR R-99B em 12/07/2006 (tamanho do *pixel*: 5 m);
- MDT extraído de cartas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) fornecido pela Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de São José dos Campos (tamanho do *pixel*: 5 m);
- imagem órbita-ponto 219-76 obtida com o sensor TM/Landsat-5 em 10/06/2006;
- cartas topográficas digitalizadas de São José dos Campos na escala 1:10.000 produzidas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC);
- banco de dados geográficos denominado Cidade Viva, criado pela Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de São José dos Campos, contendo os planos de informação altimetria, hidrografia, limite municipal, entre outros;
- 391 pontos GPS levantados por posicionamento relativo estático com precisão horizontal estimada de 1,5 cm e vertical de 3 cm;
- feições lineares levantadas por posicionamento DGPS com precisão estimada submétrica;
- programa de geoprocessamento (sistema de informação geográfica - SIG) ArcGIS versão 9.1;
- programa de processamento digital de imagens ENVI (*Environment for Visualizing Images*) versão 4.1;
- programa de processamento digital de imagens PCI Geomática versão 9.1;
- programa de geoprocessamento e processamento digital de imagens SPRING versão 4.2;
- programa de processamento de dados GPS Sokkia Spectrum Survey versão 3.50;
- receptores GPS de dupla frequência (Topcon Hiper e Ashtech Z-FX) e de uma frequência (Sokkia Stratus);

3.3 Método

3.3.1 Aerolevanteamento InSAR

O InSAR do SIPAM opera na banda X com 3 cm de comprimento de onda, utilizando a polarização HH na geração do modelo. O MDT produzido possui resolução espacial de 3 m e tamanho de *pixel* de 5 m. O sensor opera em dois modos de coleta:

- *InSAR + Single-Pol L band* com *slant range* mínimo fixo em 15 km e largura de faixa de 20 km; e
- *InSAR + Quad-Pol L band* com *slant range* mínimo de 15 km a 25 km e largura de faixa de 10 km.

A técnica de aquisição de dados interferométricos é o *across track* com linha de base espacial (interferometria por passagem simples). A altitude operacional (para a coleta de dados) varia entre 9144 a 10668 m.

O vôo foi realizado entre 20h37min e 20h45min, em 12 de julho de 2006. O sensor estava embarcado na aeronave R-99B (matrícula FAB 6750), como observado na [Figura 3.3](#). Foi utilizado o modo de coleta A.6 (*InSAR + Quad-Pol L band*) com alta resolução e imageamento ascendente, à direita do sentido de vôo. É importante ressaltar que apenas a polarização HH da banda X é empregada na geração do modelo interferométrico; a banda L não foi utilizada. O azimute magnético da linha de vôo foi de 359,53° com altitude aproximada de 9700 m. O ângulo de incidência no alcance próximo foi de 64,5° e no alcance distante de 73,4°.

3.3.2 Processamento interferométrico

Os dados coletados foram processados no programa *Sivam Ground SAR Processor* - GSP instalado em uma estação de trabalho *Sun Ultra 60* com sistema operacional *Solaris*. Os dados são processados em partes (blocos), os quais são posteriormente mosaicados. Não são geradas as imagens complexas na banda X com mesma dimensão e georeferenciamento do MDT correspondente.

O GSP não permite a entrada de coordenadas de pontos de controle (pontos com coordenadas conhecidas) da área imageada para a extração de um MDT absoluto, aceitando apenas o valor da altitude média da área, gerando apenas MDTs relativos

(sem pontos de controle). A altitude média da área de estudo usada no processamento foi de 851 m. A única intervenção no processamento realizada pelo usuário ocorria ao final do processamento InSAR, se a altitude mínima do bloco processado apresentasse valor negativo. Neste caso, o valor do *phase offset* sobre a região problemática (“ilha”) era alterado de modo empírico, sendo realizado um novo processamento e verificado o resultado obtido.



FIGURA 3.3 - Aeronave R-99B com localização dos sensores na fuselagem.
FONTE: Adaptado de Embraer (2007).

Na seqüência, os dados resultantes foram inseridos no ENVI para a continuação do processamento com aplicativos específicos desenvolvidos em IDL. Neste programa foram executadas a geocodificação, a interpolação para preenchimento das regiões sem informação e o mosaico dos blocos de imagens. O MDT gerado pode ser visualizado na [Figura 3.4](#), na qual é possível observar toda a extensão da faixa coletada. Neste trabalho foi avaliada apenas a região da faixa que estava contida dentro dos limites do Município.

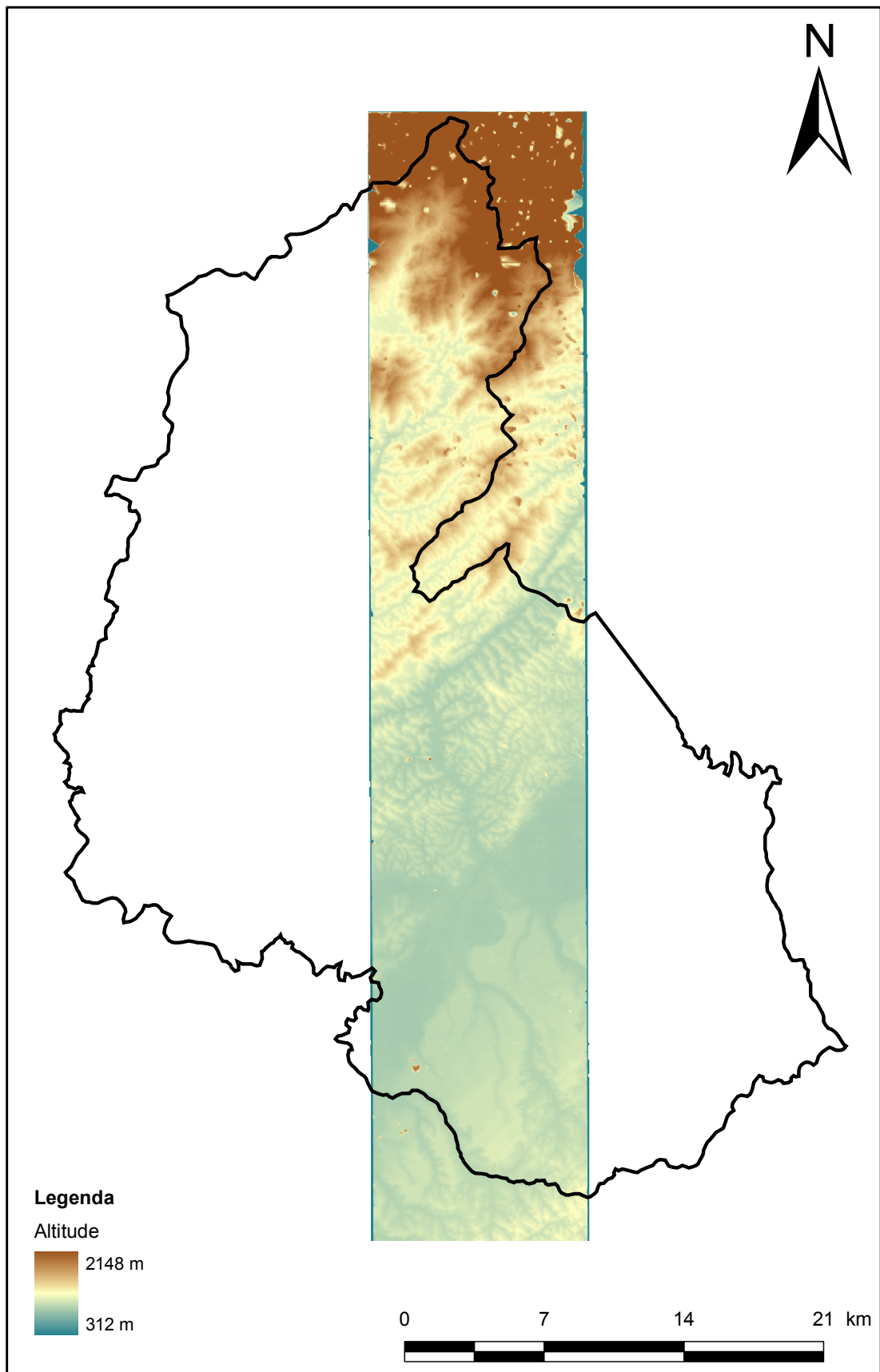


FIGURA 3.4 - MDT extraído do SAR R-99B sobre os limites do Município de São José dos Campos.

3.3.3 Estratificação da área de estudo

A análise do MDT gerado pelo SAR R-99B foi realizada por estratos. A análise por estratos teve por finalidade a determinação dos fatores que podem influenciar na acurácia do MDT. Os estratos propostos para este trabalho foram obtidos a partir da divisão da área de estudo em regiões com características físicas homogêneas.

A características físicas dos estratos são obtidas dos cruzamentos dos diferentes fatores que podem afetar a qualidade do MDT extraído de interferometria SAR. Estes fatores são representados pelas categorias de uso/cobertura do solo, de gradiente de declividade, de aspecto e de regiões da imagem na dimensão em alcance.

3.3.3.1 Gradiente de declividade

As classes de gradiente de declividade são baseadas na categorização proposta por De Biase (1993), como mostrado na [Tabela 3.1](#). Este método é fundamentado na correlação entre classes de gradiente de declividade e o relevo. Para este trabalho foram sintetizadas as classes de gradiente descritas na [Tabela 3.2](#).

TABELA 3.1 - Classes de gradiente de declividade.

Declividade (%)	Relevo
0-3	Várzea
3-6	Plano a suave ondulado
6-12	Suave ondulado a ondulado
12-20	Ondulado a forte ondulado
20-40	Forte ondulado a montanhoso
>40	Montanhoso

FONTE: De Biase, 1993.

TABELA 3.2 - Classes de gradiente de declividade empregadas.

Gradiente de declividade (%)	Classe
0-6	Plano
6-20	Ondulado
>20	Montanhoso

Os mapas contendo as componentes da declividade (gradiente e aspecto) foram extraídos do MDT obtido a partir das curvas de nível e pontos cotados das cartas

digitalizadas na escala 1:10.000 (equidistância entre as curvas de nível de 5 m).

A [Figura 3.5](#) apresenta o MDT do IGC, na qual é possível observar a variação de altitude no Município de 550 a 2015 m. Destaca-se na imagem as escarpas da Serra da Mantiqueira (em vermelho) no extremo norte e a planície do Rio Paraíba do Sul (em verde escuro) ao sul.

As curvas de nível e os pontos cotados digitalizados foram fornecidos pela Secretaria Municipal de Planejamento da Prefeitura Municipal de São José dos Campos no formato *shapefile*. Este material foi revisado no ArcGIS para corrigir possíveis erros de digitalização, tais como valores incoerentes de curvas de nível. Os valores incorretos são detectados ao se identificar linhas com valores de altitude não coerentes com as regiões vizinhas no MDT, significando tratar-se de uma curva de nível com valor incorreto.

Após a revisão das curvas de nível e dos pontos cotados, foi gerada uma malha triangular (TIN) no formato vetorial. A partir do TIN, foi criada uma malha regular com *pixel* de 5 m, no formato matricial. Esta resolução foi adotada por dois motivos: estar concordante com Câmara *et al.* (2001), que sugere que o tamanho do *pixel* deve ser preferencialmente menor ou igual a menor distância entre duas amostras com cotas diferentes e ter a mesma dimensão da célula do MDT avaliado.

O mapa contendo o gradiente de declividade foi criado a partir da malha regular. Este arquivo foi então fatiado em três classes: plano, ondulado e montanhoso, de acordo com o valor da porcentagem de inclinação do terreno. O mapa de gradiente de declividade foi obtido no final deste processo.

3.3.3.2 Aspecto

As classes de aspecto foram adaptadas de Toutin (2002). Estas classes estão relacionadas à orientação da face da estrutura de relevo com a direção do feixe incidente proveniente do SAR. Foram determinadas 5 classes: azimutal (no sentido de vôo), anti-azimutal (no sentido oposto ao de vôo), frontal (defronte ao feixe propagado), dorsal (oposto ao frontal) e sem aspecto (quando o gradiente de declividade é plano). A [Figura 3.6](#) apresenta a vista superior de uma montanha com formato cônico sendo iluminada pelo SAR aerotransportado. Os limites angulares definidos para cada quadrante são apresentados na [Tabela 3.3](#), sendo contado em sentido horário a partir do norte e variando de 0° a 360°.

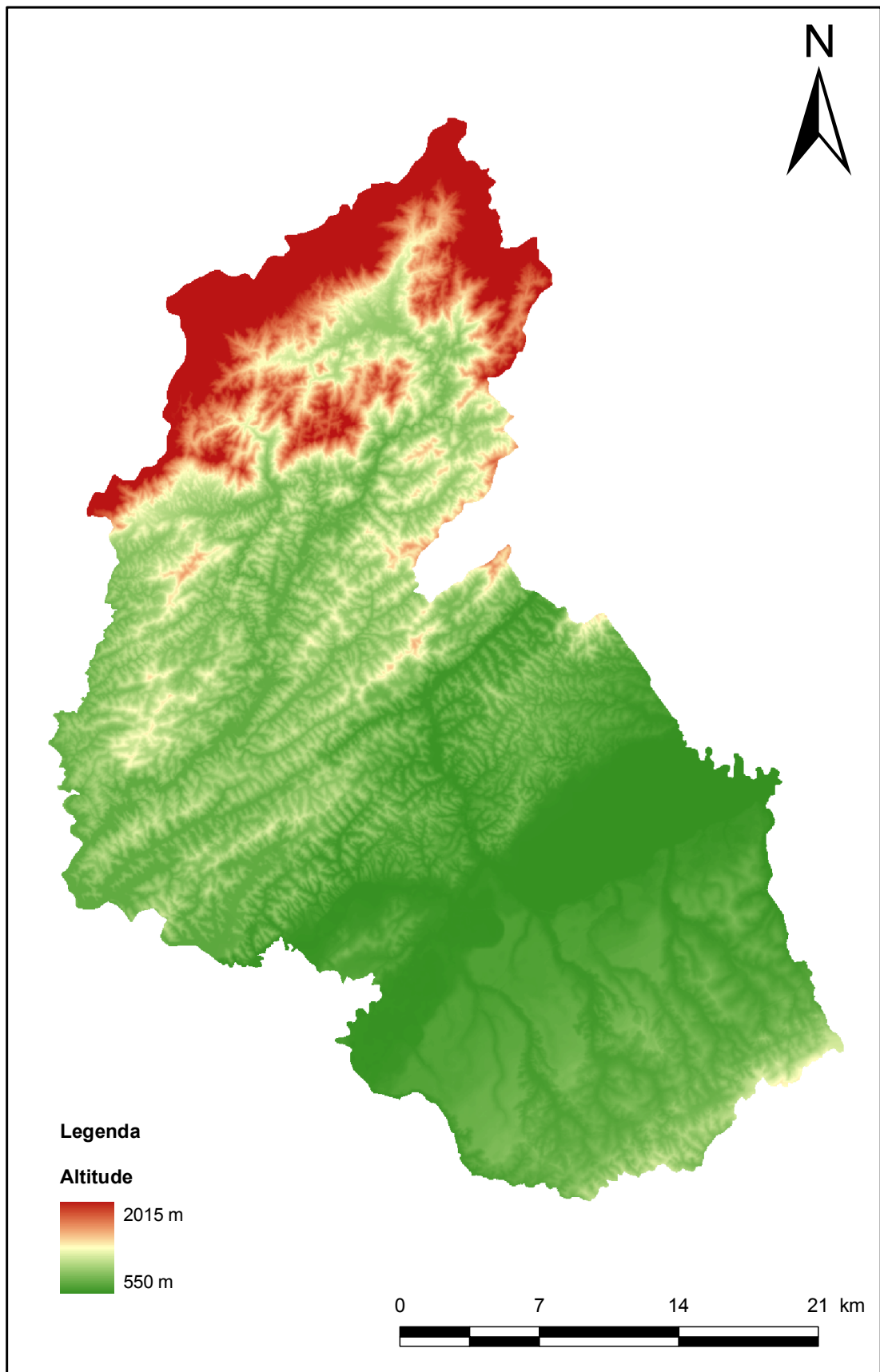


FIGURA 3.5 - Modelo digital do terreno (IGC) do Município de São José dos Campos.

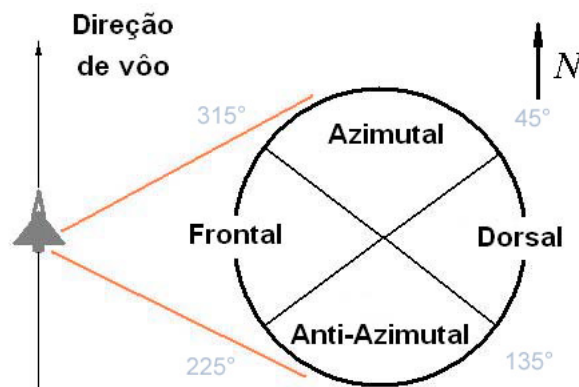


FIGURA 3.6 - Vista superior de uma montanha iluminada pelo SAR.

TABELA 3.3 - Classes de aspecto empregadas.

Classe	Limites
Azimutal	315° a 45°
Dorsal	45° a 135°
Anti-Azimutal	135° a 225°
Frontal	225° a 315°

O mapa de aspecto também foi obtido pelo fatiamento da malha regular, obtendo-se as classes desejadas. As classes com gradiente de declividade plana foram atribuídas à classe sem aspecto. O valor de cada *pixel* da grade de aspecto indica a direção do gradiente de declividade deste *pixel*. O gradiente de declividade e o aspecto foram obtidos com o ArcGIS, por uma operação realizada com uma janela 3x3 sobre o MDT do IGC.

3.3.3.3 Uso/cobertura do solo

As classes de uso e cobertura do solo estudadas neste trabalho são baseadas naquelas determinadas no banco Cidade Viva: área urbanizada, área de cultura, corpo d'água, floresta ou cerrado, nuvem, pastagem, reflorestamento e sistema viário. Destas classes foram inicialmente selecionadas área urbana, cultura, floresta, pastagem, corpo d'água e solo exposto. Posteriormente, devido às restrições encontradas na execução do levantamento dos pontos amostrados em campo, foram excluídas as classes floresta e corpo d'água por indisponibilidade de um aparelho topográfico (estação total) que permitisse o levantamento de pontos nestas classes. A classe solo exposto não

foi levantada por se tratar de uma classe sujeita à freqüentes modificações devido à terraplenagem.

Para a obtenção das classes de uso/cobertura do solo foram utilizadas as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 de uma imagem do sensor TM/Landsat-5, com resolução espacial de 30 m. Esta imagem foi coletada 32 dias antes do imageamento com o SAR R-99B, minimizando diferenças causadas por alterações na paisagem da região, no intervalo de tempo das duas passagens.

A imagem foi ortorretificada com o módulo *Orthoengine* do *Geomatica* para corrigir distorções devido ao deslocamento do relevo. Foi utilizado como referência planimétrica um arquivo vetorial contendo o sistema viário e a hidrografia do Município, proveniente do banco de dados Cidade Viva. A referência altimétrica foi o MDT com equidistância de 5 m (extraído de cartas do IGC), reamostrado para um tamanho de *pixel* de 30 m, para ser compatível com a dimensão do *pixel* da imagem TM/Landsat-5.

Foram selecionados 68 pontos de controle bem distribuídos na imagem, com um erro médio quadrático final de 28,2 m (0,94 *pixel*), sendo empregados 3 coeficientes para o polinômio racional utilizado na ortorretificação. A imagem ortorretificada foi então recortada, a fim de ter a mesma forma da área coberta pelo vôo realizado com o SAR R-99B no Município.

A seguir, foi empregada a classificação supervisionada de máxima verossimilhança (MAXVER) com o ENVI, para que fossem extraídas as classes de interesse a partir da imagem ortorretificada. Para as classes de interesse (área urbana, solo exposto, água, cultura, pastagem e floresta) foram coletadas amostras de treinamento em áreas previamente reconhecidas em campo. Cada classe foi amostrada com vários subconjuntos, de acordo com a variabilidade de respostas espectrais. Buscou-se que cada subconjunto fosse o mais homogêneo possível em relação à resposta espectral. Para cada classe foi coletada uma quantidade superior a uma centena de *pixels*.

A imagem classificada foi visualmente analisada, sendo então exportada para o formato *shapefile*, a fim de ser transformada para o formato vetorial e permitir a edição do arquivo obtido. Na edição vetorial, foram corrigidos os erros de omissão e inclusão originários da classificação, por meio de interpretação de imagens e reconhecimento em campo.

3.3.3.4 Regiões da imagem na dimensão em alcance

Foram avaliadas as classes associadas à geometria da imagem, ao longo da direção em alcance (transversal) da faixa imageada. Foram analisados os resultados obtidos em duas regiões: alcance próximo e alcance distante. Cada uma destas classes ocupa metade da faixa imageada no sentido longitudinal, conforme [Figura 3.7](#). A primeira classe foi delimitada entre a linha de alcance próximo e a linha que divide a faixa pela metade; a partir desta linha até a linha do alcance distante foi delimitada a segunda classe.

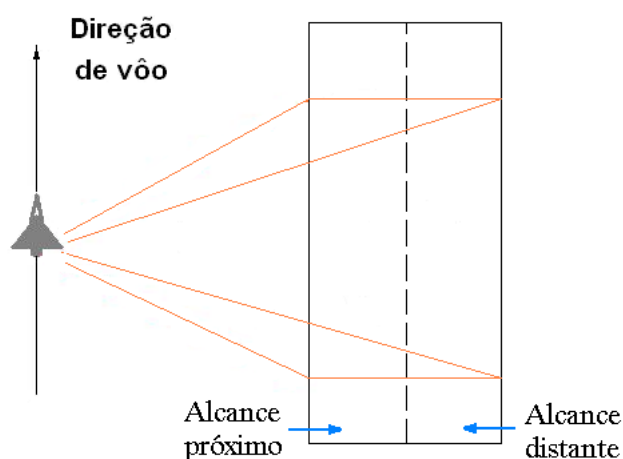


FIGURA 3.7 - Classes de regiões na dimensão em alcance sobre a faixa imageada.

Foram gerados dois polígonos com dimensões idênticas em um formato vetorial, dividindo a área de estudo em duas partes: alcance próximo e alcance distante. Estes polígonos foram empregados na divisão da imagem de estratos.

3.3.3.5 Cruzamento das categorias

Foi aplicada uma operação de intersecção espacial, isto é, um cruzamento das categorias, obtendo-se um mapa de cruzamentos a partir dos planos de informação contendo o gradiente de declividade, o aspecto, o uso/cobertura do solo e a região da imagem na dimensão em alcance para serem gerados os estratos de interesse. A combinação de todos os possíveis cruzamentos de categorias resultou em 108 estratos. Contudo, existem apenas 97 estratos na área de estudo.

O próximo passo consistiu na aplicação de um filtro morfológico de erosão nos mapas de estratos. Este filtro foi utilizado para que as regiões vizinhas das bordas fossem eliminadas dos estratos. Estas regiões possuem um alto grau de incerteza causado pelo fato destas regiões serem interfaces entre estratos com características diferentes. A filtragem morfológica minimiza possíveis erros de classificação do mapa de estratos ao eliminar estas regiões.

Foram utilizadas duas nomenclaturas para este trabalho. A nomenclatura original foi usada no levantamento de campo, adotado-se um nome composto pela letra E (significando estrato), o número atribuído ao estrato (três dígitos) e finalmente o número do ponto (dois dígitos). Por exemplo, o ponto E06715 é o ponto 15 do estrato 67.

A fim de facilitar a identificação de cada estrato nas análises realizadas, foi criada uma segunda nomenclatura baseada nas iniciais das categorias que compõem cada estrato. Assim, o estrato PISAuAd corresponde ao estrato plano (Pl), sem aspecto (S), em área urbana (Au), no alcance distante (Ad). A numeração dos estratos obtida por todos os possíveis cruzamentos de categorias (108 estratos) pode ser observada na [Tabela A.1](#) do Apêndice A.

3.3.4 Amostragem

O método de amostragem empregado para a seleção dos pontos amostrais (cujas coordenadas geodésicas e altitudes elipsoidais seriam levantadas em campo), foi a amostragem aleatória estratificada uniforme. Este método foi adotado por melhor se adequar ao estudo dos cruzamentos das categorias de interesse, permitindo apresentar estimativas estatísticas para cada estrato, e também por possibilitar uma melhoria da precisão das estimativas em relação a amostragem aleatória simples (Bolfarine e Bussab, 2005).

Dos 97 estratos existentes na área de estudo, somente 52 estratos poderiam ser medidos com GPS. Os estratos floresta e água necessitariam do emprego da estação total para a medição dos pontos, sendo descartados do presente trabalho. Os estratos de solo exposto também foram excluídos pois, em campo, constatou-se que estes estratos ocorriam em áreas sujeitas à terraplenagem, com constante alteração do relevo. Dos estratos remanescentes, foi possível completar a medição de 26 estratos, devido às dificuldades logísticas encontradas na execução do levantamento de campo.

A listagem completa dos estratos efetivamente levantados consta na [Tabela A.2](#) do Apêndice A.

Foram selecionados 10 pontos por estrato para a amostragem. A estimativa inicial era levantar 52 estratos, ou seja, 520 pontos. Considerando-se 30 minutos de rastreamento por ponto, seriam necessários 260 horas de medição (sem considerar os tempos de deslocamento, montagem e desmontagem dos receptores base, etc.), ou seja, uma quantidade de pontos superior a 10 seria inviável de ser levantada em campo, considerando-se os recursos logísticos disponíveis.

Após a determinação do tamanho das amostras, foi realizado um sorteio aleatório por estrato, nas imagens estratificadas e erodidas. A quantidade de pontos sorteados por estrato incluía pontos extras, a fim de possibilitar a medição de pontos opcionais quando o ponto escolhido para ser levantado fosse inacessível ou estivesse em condições inadequadas para o levantamento (próximo a edifícios, árvores altas, etc.). Foram sorteados 5 pontos extras por estrato, para possibilitar a escolha de pontos alternativos em caso de serem sorteados pontos inacessíveis em campo.

3.3.5 Levantamento de campo

Para a realização do levantamento, as estações de referência foram posicionadas em várias localidades, para otimizar o tempo de rastreamento com os receptores GPS e garantir uma maior precisão dos pontos levantados. Isto deveu-se ao fato de que quanto maior a distância entre as estações de referência e os receptores remotos, maior será o tempo de rastreamento e menor a precisão alcançada.

A referida distância entre o par de receptores raramente excedeu 10 km. De acordo com Ashtech (1998) e Sokkia (2002), fabricantes dos receptores com menor precisão empregados, as precisões horizontal e vertical (altitude elipsoidal) esperadas estão descritas na [Tabela 3.4](#), onde D_i é a distância (em quilômetros) entre o receptor base e o remoto e ppm significa parte por milhão.

A expectativa é que os pontos levantados tenham uma precisão horizontal de 1,5 cm e vertical de 3 cm em condições adequadas (quantidade de satélites rastreados superior a 5, baixo multicaminho, geometria da constelação apropriada, ausência de obstrução, baixa atividade atmosférica e soluções fixas de ambigüidade).

As estações de referência estão distribuídas de acordo com a [Figura 3.8](#); os círculos

TABELA 3.4 - Precisão dos receptores empregados.

Receptor	Função	Precisão Horizontal	Precisão Vertical
Ashtech Z-FX	Remoto	5 mm + 1 ppm x Di	10 mm + 1 ppm x Di
Sokkia Stratus	Remoto	5 mm + 1 ppm x Di	10 mm + 2 ppm x Di
Topcon Hiper	Base	5 mm + 0,5 ppm x Di	5 mm + 1,4 ppm x Di

FONTE: Ashtech (1998), Sokkia (2002) e Topcon (2004).

representam um raio de 10 km a partir de cada estação. Preferencialmente foram utilizadas duas estações simultaneamente ocupadas por receptores base, o que conferiu um segundo vetor para verificar se as diferenças das altitudes dos pontos assim levantados estavam de acordo com a precisão esperada.

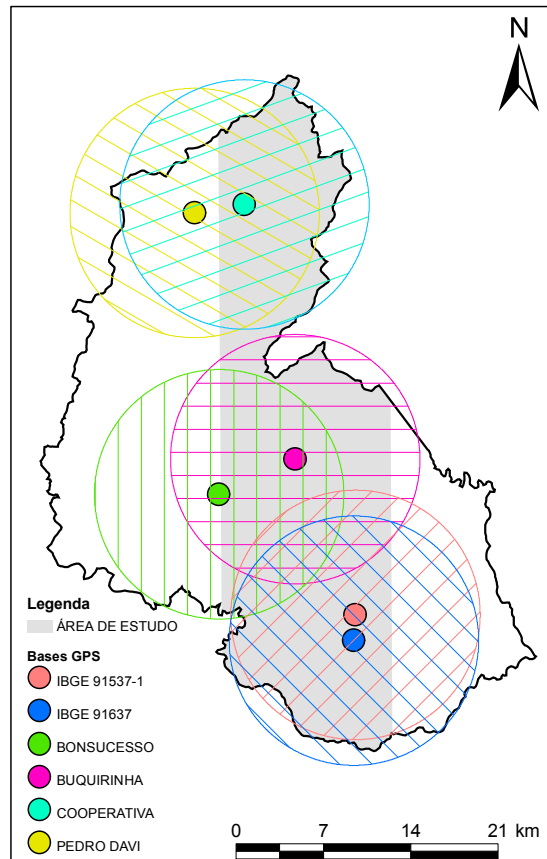


FIGURA 3.8 - Localização das estações de referência com respectivas áreas de cobertura.

Nem sempre foram determinados dois vetores por ponto, por indisponibilidade de receptores ou de pessoal. Isto não significa que há dois conjuntos de pontos com

precisões diferentes (pelo fato de possuir um ou dois vetores). Os pontos que possuem dois vetores utilizam apenas as coordenadas extraídas do vetor com melhor solução de cada par. O outro vetor era utilizado apenas para avaliar a diferença das altitudes medidas.

Para o levantamento de campo, os pontos amostrados foram previamente inseridos em receptores de navegação, para facilitar a localização destes por posicionamento absoluto. As equipes navegavam com os receptores GPS até estarem o mais próximo possível da posição dos pontos. Procurava-se então, no local, uma posição favorável com pouca ou nenhuma obstrução e longe das bordas da feição de interesse. Determinado o local, era realizada uma confirmação das características procuradas com aquelas encontradas, tais como o gradiente de declividade, o aspecto, o uso/cobertura e a região da imagem (alcance próximo e distante).

No local mais apropriado era identificada visualmente a direção mais proeminente de decaimento da vertente, sendo então realizada a leitura do aspecto com uma bússola para àquela direção. Cabe ressaltar que esta identificação é prejudicada quando existe no local vegetação alta ou quando o terreno é pouco inclinado, sendo nestes casos realizadas diversas medições de gradiente de declividade em várias direções para identificar a direção correta.

Confirmado o aspecto encontrado com o procurado, era realizada a medição do gradiente de declividade. O gradiente de declividade era medido com um clinômetro posicionado aproximadamente a 30 m encosta acima de onde seria posicionado o alvo, visando uma referência (com uma distância vertical do solo idêntica ao do clinômetro) localizada a 60 m encosta abaixo, conforme o método descrito por Valeriano (1999).

Adotou-se um padrão de materialização dos pontos que oferecesse a melhor relação entre praticidade e durabilidade, sendo empregadas barras de aço com 0,5” de diâmetro por aproximadamente 30 cm de comprimento. A materialização foi realizada para possibilitar a reocupação dos pontos em caso de verificação de resultados ou uso destes pontos para outros fins. Estas barras eram cravadas até o nível do solo, evitando assim qualquer remoção ou deslocamento por impacto de algum objeto se deslocando sobre a superfície. Para cada ponto materializado, era também cravada uma estaca de madeira a aproximadamente 1 m, na direção norte, sendo ali escrito o nome do ponto.

Em áreas urbanas foram utilizados pregos de aço de 5 cm com arruela para facilitar a localização em pisos asfaltados e calçadas de concreto. Não foram materializados os pontos localizados em áreas de cultura (para não danificar o maquinário agrícola) e nem aqueles sobre a cobertura de edifícios (para não comprometer a manta de impermeabilização).

Outro recurso empregado na descrição de cada ponto foi a fotografia digital. Os pontos foram fotografados nas direções norte, este, sul e oeste, considerando-se o contexto espacial onde estavam inseridos. Isto facilita o reconhecimento do ponto não apenas *in loco*, mas também no uso de uma imagem da área.

O levantamento GPS foi realizado empregando o posicionamento relativo estático, excedendo os intervalos de sessão tabelados pelo fabricante (que aumentam com o incremento da distância base-remoto), para que houvesse um tempo maior de rastreamento, melhorando a precisão. Em locais com obstrução foram utilizados bastões fixos e telescópicos.

Para anotar os dados do levantamento, foi utilizada uma caderneta de campo elaborada para este trabalho. Nesta planilha eram anotados os nomes do ponto e do local, horas de início e término da sessão, data, altura e método de medição da antena, tipo de uso/cobertura do solo, valores do gradiente de declividade e do aspecto, altura da vegetação e identificadores das fotos. Também era desenhado um croqui, para complementar a descrição do ponto.

Foram levantados 391 pontos GPS com o método de posicionamento relativo estático. Os pontos coletados foram processados e avaliados em um programa específico do fabricante do GPS. Após o processamento, apenas 297 pontos puderam ser aproveitados, conforme ilustrado na [Figura 3.9](#). Os outros estavam com solução fluante de ambigüidade (resultados com precisão inferior) ou levantados próximos às bordas de feições. 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. A [Tabela 3.5](#) apresenta a distribuição dos pontos medidos por estrato.

Os pontos em área urbana foram levantados em logradouros, topos de edificações

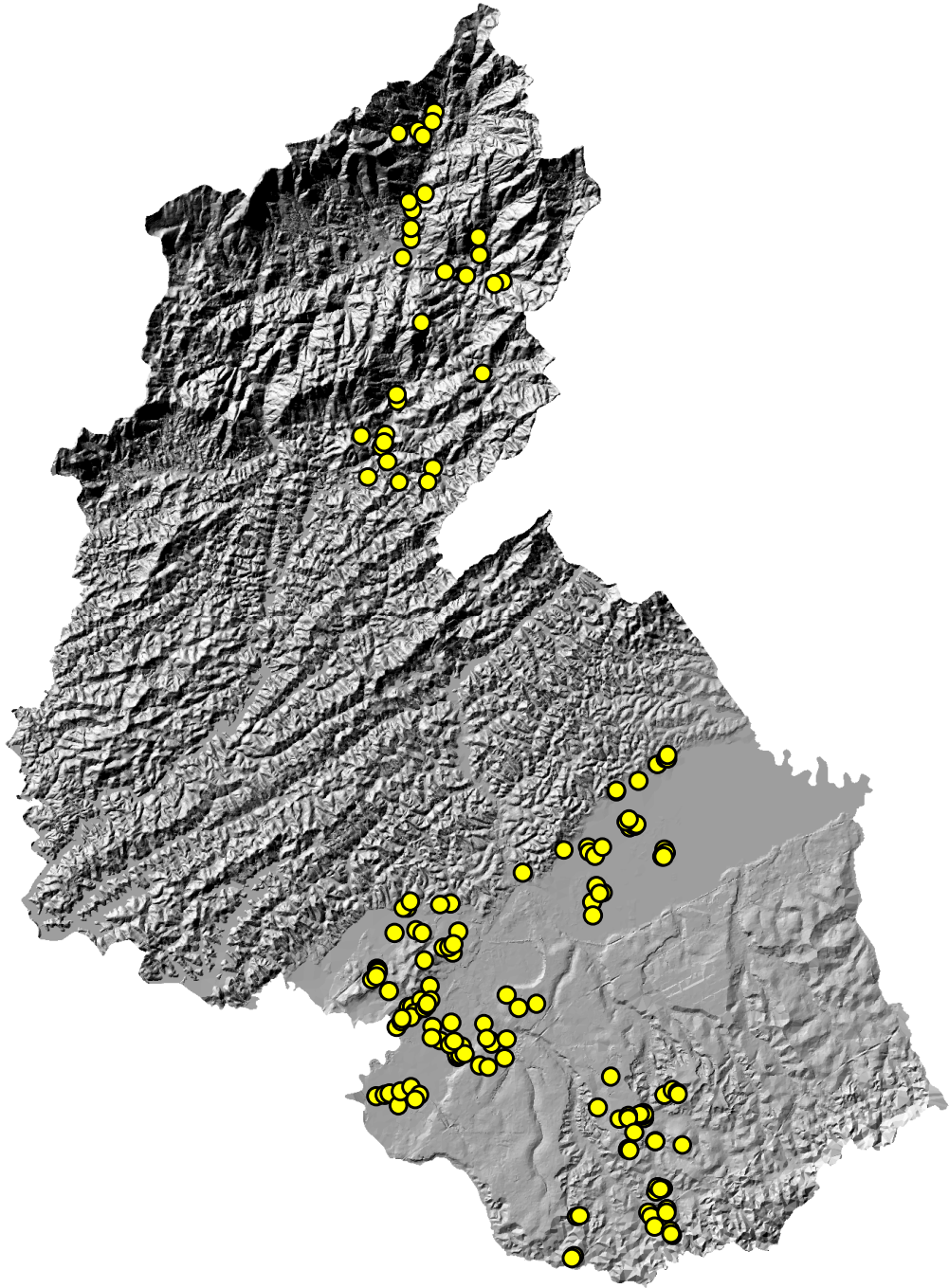


FIGURA 3.9 - Localização dos pontos GPS sobre o relevo sombreado do Município de São José dos Campos.

(casa, caixa d'água e prédios), quadras poli-esportivas, estacionamentos, etc. Aqueles localizados em área de cultura foram levantados em plantações de milho, feijão, arroz, hortaliças, cana-de-açúcar e mandioca. As áreas de pastagem incluíram capim de altura baixa, média e alta, bem como áreas de transição entre pastagem e cerrado, conforme ilustrado no Apêndice B.

TABELA 3.5 - Distribuição de pontos GPS por estrato.

ESTRATO	NÚMERO DE PONTOS
PISCAp	11
PISPaAp	13
PISAuAp	15
OAzPaAp	14
OAzAuAp	10
OFPaAp	10
OFAuAp	10
OAApPaAp	13
OAApAuAp	10
ODPaAp	13
ODAuAp	10
MAzPaAp	12
MFPaAp	12
MAAaPaAp	11
MDPaAp	15
PISCAd	14
PISPaAd	11
PISAuAd	10
OAzPaAd	9
OFPaAd	10
OAApPaAd	12
ODPaAd	8
MAzPaAd	12
MFPaAd	11
MAAaPaAd	8
MDPaAd	13

Foi também realizado um levantamento DGPS pós-processado ([Figura 3.10](#)) das principais vias terrestres do Município (dentro ou próximo da mancha urbana), passíveis de serem identificadas visualmente no MDT interferométrico. O levantamento cobriu uma extensão de quase 200 km de eixos de vias terrestres, tendo sido empregado um receptor GPS com a antena fixada em um bastão sobre um veículo.



FIGURA 3.10 - Traçado das vias terrestres levantadas por GPS sobre o relevo sombreado do Município de São José dos Campos.

3.4 Análise dos Dados

De acordo com o fluxograma apresentado na [Figura 3.11](#), a análise dos dados foi dividida em análise qualitativa e quantitativa. Cada um dos componentes do fluxograma são descritos detalhadamente nos tópicos subseqüentes.

A análise qualitativa constituiu-se de uma inspeção visual do MDT para detectar a presença de problemas no modelo. A análise quantitativa consistiu na aplicação de procedimentos estatísticos (detecção de *outliers*, análise dos erros, testes de hipóteses, etc.), tanto para a avaliação cartográfica tradicional (análise global dos erros de toda a área de estudo) quanto na avaliação dos erros por estratos.

3.4.1 Análise Qualitativa

A primeira análise realizada com o MDT gerado pelo SAR R-99B foi em relação ao seu posicionamento, sabendo-se que o posicionamento do sensor é realizado por um sistema de navegação GPS-inercial, que tem como solução GPS o posicionamento absoluto. Este posicionamento pode ter um erro planimétrico maior que a resolução do *pixel* do MDT avaliado (5 m), o que pode provocar o deslocamento do MDT de sua posição correta.

O MDT original foi comparado com o arquivo vetorial de eixos de vias terrestres medido por DPGS, tendo-se observado que o MDT estava deslocado e rotacionado em relação aos dados de referência, necessitando de uma correção geométrica para permitir uma avaliação altimétrica isenta da influência de erros planimétricos.

Também foram realizadas análises visuais para se buscar possíveis problemas no MDT, tais como: falhas no mosaico, regiões com altitudes anômalas em relação à vizinhança, áreas interpoladas, etc. O MDT do IGC foi utilizado como referência.

Foi empregada a imagem de relevo sombreado da altimetria oriunda do MDT avaliado. Este tipo de imagem é uma ferramenta eficiente na identificação de anomalias por oferecer diferentes perspectivas da superfície, segundo Maune (2007).

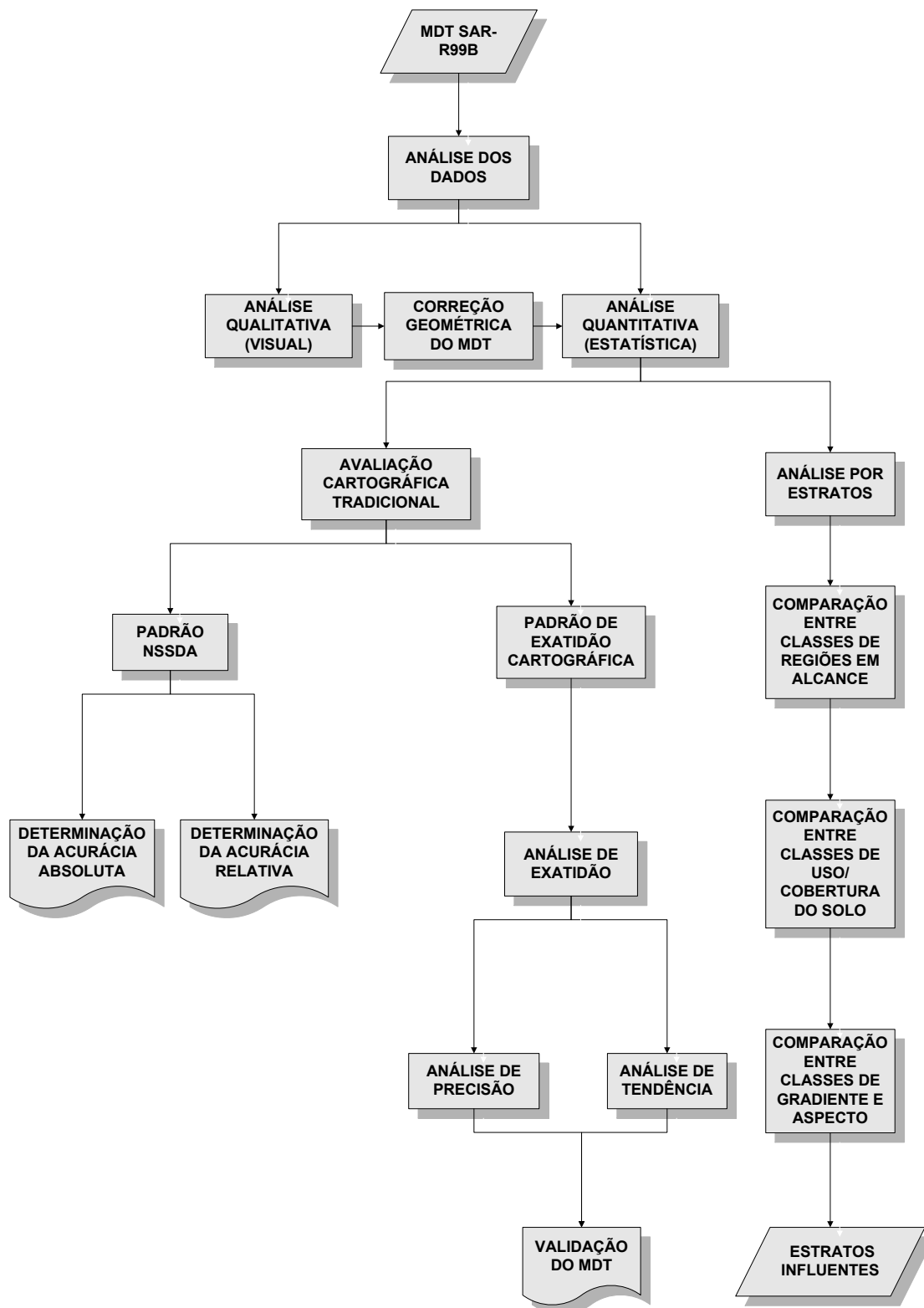


FIGURA 3.11 - Etapas da análise dos dados.

3.4.2 Análise Quantitativa

Para a análise quantitativa, o erro (e) após a correção geométrica foi definido como

$$e = Z_{MDT_{CORRIGIDO}} - Z_{GPS} \quad (3.1)$$

onde $Z_{MDT_{CORRIGIDO}}$ é a altitude no MDT corrigido e Z_{GPS} é a altitude GPS correspondente. A altitude extraída do MDT corrigido não foi interpolada, sendo utilizado o valor central do *pixel*.

A primeira etapa da análise quantitativa consistiu em uma busca de *outliers* nas amostras. Foram usados *box plots* cujos comprimentos dos retângulos representam o erro-padrão e os segmentos (*whiskers*) correspondem ao desvio-padrão dos erros de cada estrato, tendo sido considerados *outliers* os valores que excediam em três vezes o erro-padrão.

Na seqüência, foi realizada uma análise de regressão, com o propósito de avaliar o desempenho dos MDTs original e corrigido (transladado e rotacionado), tendo as altitudes dos pontos GPS como referência. A regressão linear simples permite identificar a relação entre duas variáveis aleatórias e obter uma medida quantitativa (coeficiente de determinação) deste nível de relacionamento (Devore, 2006).

Foram gerados os diagramas de dispersão da altitude dos MDTs (variável dependente) versus a altitude GPS (variável independente), as retas de regressão estimadas e os coeficientes de determinação. Adicionalmente, foram realizados testes de hipóteses para verificar se o intercepto (β_0) e o coeficiente angular ou inclinação (β_1) eram estatisticamente iguais a zero e a um, respectivamente. O intercepto é o valor que corresponde à posição em que a reta de regressão cruza o eixo y e o coeficiente angular é a tangente do ângulo formado entre a reta de regressão e a abscissa.

Foram também determinados intervalos de confiança, baseados no procedimento de Bonferroni, para verificar se estatisticamente o intercepto era nulo e o coeficiente angular era igual a um, simultaneamente. Segundo Neter *et al.* (1996), este procedimento permite a determinação de β_0 e β_1 simultaneamente, com um nível de confiança conhecido, dado que estes parâmetros são estimados a partir da mesma amostra (não são independentes).

3.4.3 Avaliação Cartográfica Tradicional

A avaliação consistiu na aplicação de duas metodologias distintas para validar o MDT gerado pelo SAR R-99B. Foi realizada uma análise de acurácia para validar o MDT de acordo com o PEC, e foi aplicada a metodologia do NSSDA para a quantificar a acurácia vertical.

A análise de exatidão constituiu na aplicação do método descrito por Galo e Carmargo (1994) e aplicado à avaliação de MDT por Oliveira (2005). Consiste no controle de qualidade de produtos cartográficos pela aplicação de um procedimento de análise de exatidão cartográfica. Este método avalia o grau de discrepância (erro) entre as altitudes do produto cartográfico e àquelas levantadas em campo. A análise é baseada na aplicação de testes estatísticos específicos.

A análise de exatidão é dividida em análises de tendência e de precisão. A análise de tendência procura identificar a presença de erros sistemáticos no modelo, tais como o deslocamento uniforme nos valores das altitudes.

A análise de tendência é baseada em um teste de hipóteses que supõe como hipótese nula, que a média dos erros (μ_e) é igual a zero, ou seja, não há erros sistemáticos no produto

$$\begin{aligned} H_0: \mu_e &= 0 \\ H_1: \mu_e &\neq 0 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Como não são conhecidos os parâmetros da distribuição dos erros (média e desvio-padrão populacional), a estatística de teste é baseada na distribuição *t-Student*, com $n - 1$ graus de liberdade devido a estimação do desvio-padrão populacional. O valor da estatística t é definido como

$$t = \frac{\bar{e}}{s_e} \sqrt{n} \tag{3.3}$$

onde \bar{e} e s_e são a média e o desvio-padrão amostrais das discrepâncias, respectivamente.

Rejeita-se H_0 se

$$|t| \geq t_{\frac{\alpha}{2};n-1} \quad (3.4)$$

onde $t_{\frac{\alpha}{2};n-1}$ é o valor da distribuição t -Student, α é o nível de significância para um teste bicaudal e $n - 1$ são os graus de liberdade.

A análise de precisão tem por objetivo verificar se o resultado alcançado pelo desvio-padrão amostral dos erros, atende determinada escala cartográfica, de acordo com a classificação especificada pelo PEC.

É aplicado um teste de hipóteses, tendo-se como hipótese nula, que o desvio-padrão amostral (s_e) é estatisticamente igual ao desvio-padrão especificado pelo PEC para determinada escala

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_e^2 &\leq \sigma_{PEC}^2 \\ H_1: \sigma_e^2 &> \sigma_{PEC}^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde σ_e^2 e σ_{PEC}^2 são as variâncias populacionais dos erros encontrados no MDT e a especificada pelo PEC, respectivamente.

A estatística empregada para o teste é dada por

$$\chi^2 = (n - 1) \frac{s_e^2}{\sigma_{PEC}^2}. \quad (3.6)$$

onde s_e^2 e σ_{PEC}^2 são a variância amostral e a variância especificada pelo PEC, respectivamente.

A hipótese nula é rejeitada se

$$\chi^2 > \chi_{\alpha;n-1}^2 \quad (3.7)$$

onde $\chi_{\alpha;n-1}^2$ é o valor da distribuição qui-quadrado, α é o nível de significância para um teste monocaudal e $n - 1$ são os graus de liberdade.

3.4.4 Análise por Estratos

A análise por estratos teve por objetivo principal, identificar quais fatores afetavam a qualidade do MDT e quais os erros médios e desvios-padrão de cada estrato. Para tal propósito, foram aplicados testes não-paramétricos aos erros de cada estrato, pois o tamanho da amostra em cada estrato era pequeno e para algumas destas amostras os erros não puderam ser considerados normalmente distribuídos de acordo com o teste de Shapiro-Wilk.

Foram realizados os testes não-paramétricos para três ou mais amostras independentes de Kruskal-Wallis e o de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras para comparar os erros dos estratos.

De acordo com Siegel (1977), o teste de Kruskal-Wallis testa a hipótese nula, de que várias amostras provenham da mesma população ou de populações idênticas com relação as médias. É mais sensível as diferenças entre as amostras, podendo ser considerado o teste não-paramétrico mais eficiente para três ou mais amostras independentes, quando comparado com o teste F (ANOVA).

O teste de Kolmogorov-Smirnov de duas amostras comprova se duas amostras foram extraídas da mesma população (ou de populações com mesma distribuição), sendo sensível as diferenças de tendência central, dispersão, assimetria, etc. É considerado o teste mais poderoso para comprovar qualquer tipo de diferença entre duas amostras (Siegel, 1977).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Este Capítulo apresenta os resultados encontrados com a estratificação da área de estudo, a correção geométrica do MDT, a análise visual, a detecção e remoção dos *outliers*, a análise de regressão, a avaliação cartográfica tradicional e a análise por estratos.

4.1 Estratificação da Área de Estudo

O resultado da extração das classes de gradiente de declividade é o mapa apresentado na [Figura 4.1](#). Neste mapa é possível observar a várzea do Rio Paraíba do Sul, representada pela grande área verde, limitada pelo relevo predominantemente ondulado (em amarelo) dos Morros da Serra do Mar ao sul e o gradiente de declividade montanhoso da Serra da Mantiqueira ao norte (em vermelho).

A [Figura 4.2](#) mostra o mapa de aspecto obtido. A grande área da classe sem aspecto, corresponde à várzea do Rio Paraíba do Sul e da região coberta pela mancha urbana da Cidade. É possível observar uma maior ocorrência de vertentes com orientação frontal no norte da área de estudo (em vermelho).

O mapa de uso/cobertura do solo pode ser observado na [Figura 4.3](#), na qual se nota a predominância da classe pastagem na área de estudo. A classe floresta (em verde) ocorre com maior frequência no norte do Município. A grande mancha urbana (em rosa) representa a Cidade de São José dos Campos, ao sul. Há também uma pequena classe da área urbana ao norte, que corresponde ao Distrito de São Francisco Xavier. As áreas de cultura (em laranja) estão concentradas próximas ao Rio Paraíba do Sul (em azul) que corta a área de estudo.

O mapa de estratos obtido pelo cruzamento das categorias de gradiente de declividade, de aspecto, de uso/cobertura do solo e das regiões da imagem na dimensão em alcance é mostrado na [Figura 4.4](#) e sua legenda se encontra no Apêndice C.

4.2 Correção Geométrica do MDT

Com o objetivo de minimizar os erros de orientação do MDT original para uma avaliação altimétrica mais precisa, foi empregada uma correção geométrica do MDT que incluiu uma translação e uma rotação. Um MDT, assim como uma carta, deve

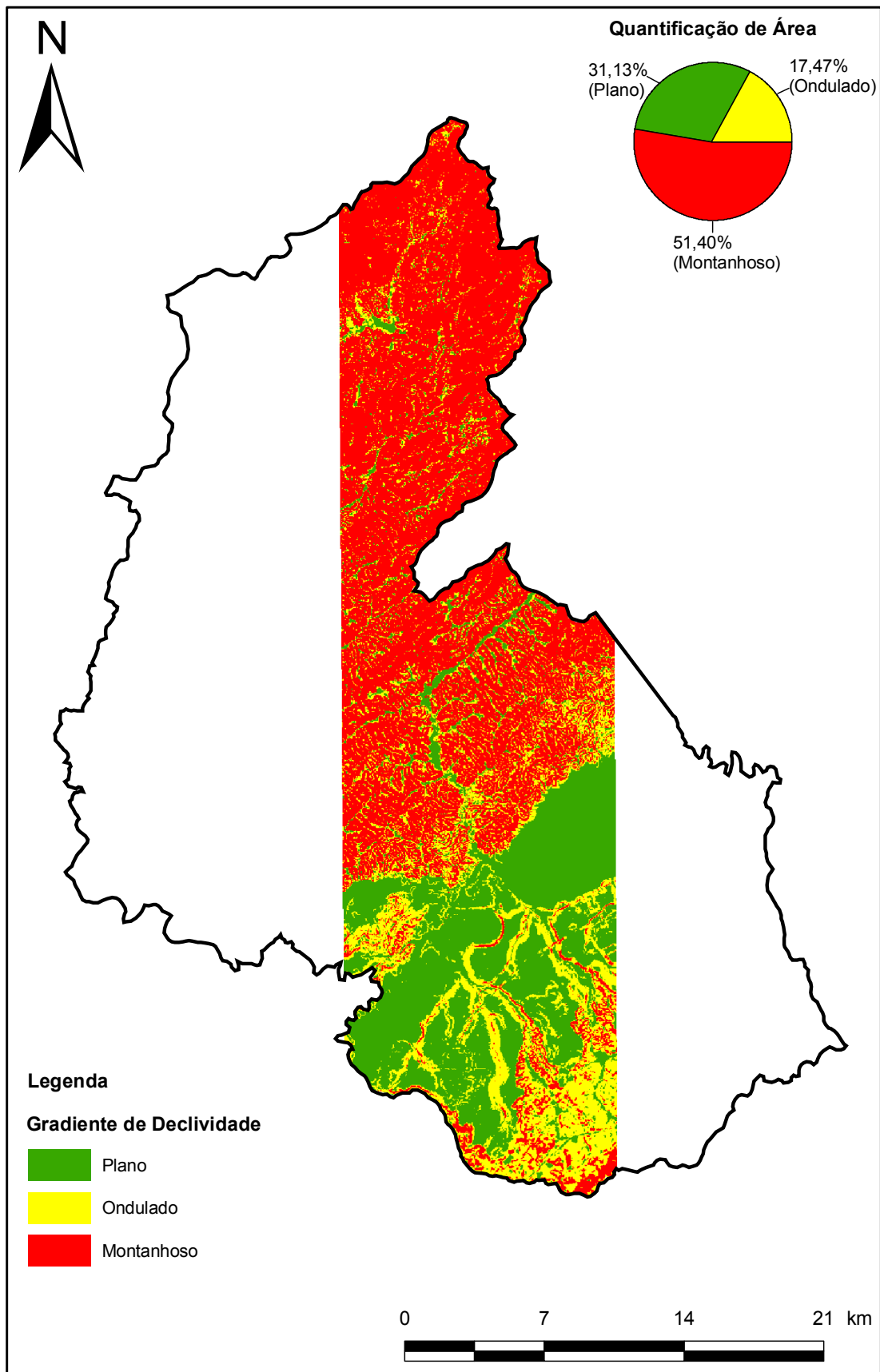


FIGURA 4.1 - Mapa de classes de gradiente de declividade da área de estudo.

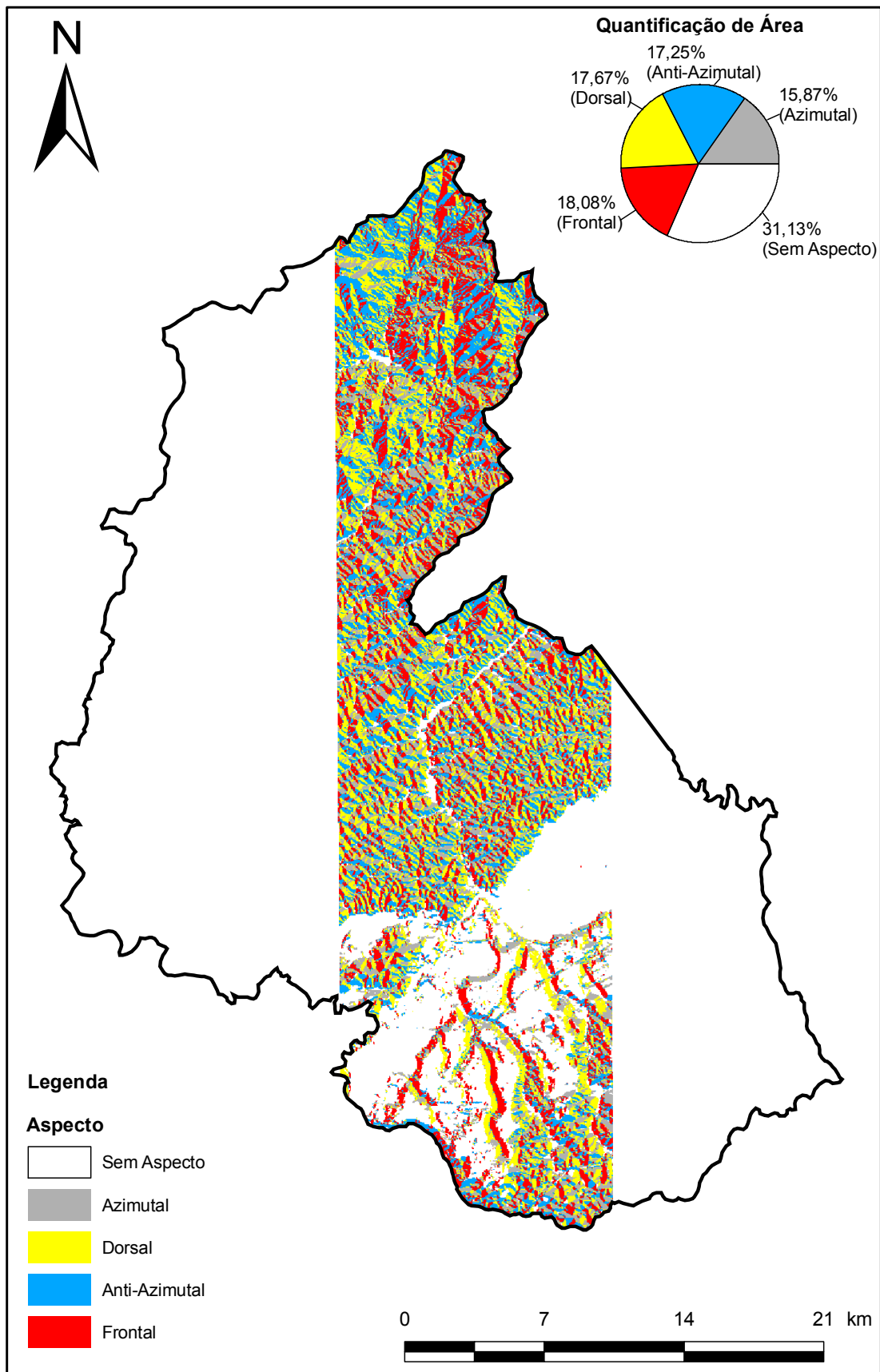


FIGURA 4.2 - Mapa de classes de aspecto da área de estudo.

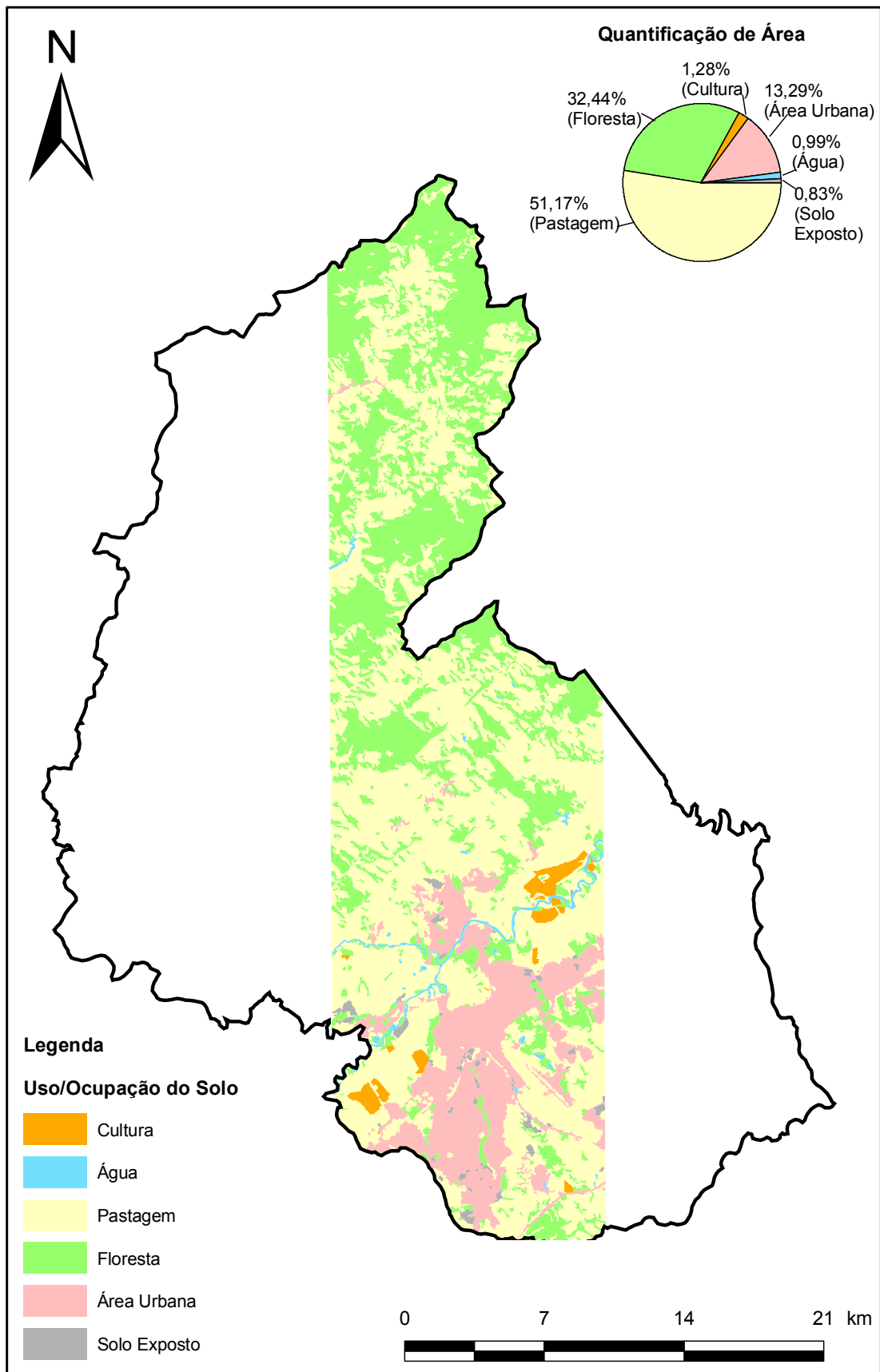


FIGURA 4.3 - Mapa de classes de uso/cobertura do solo da área de estudo.

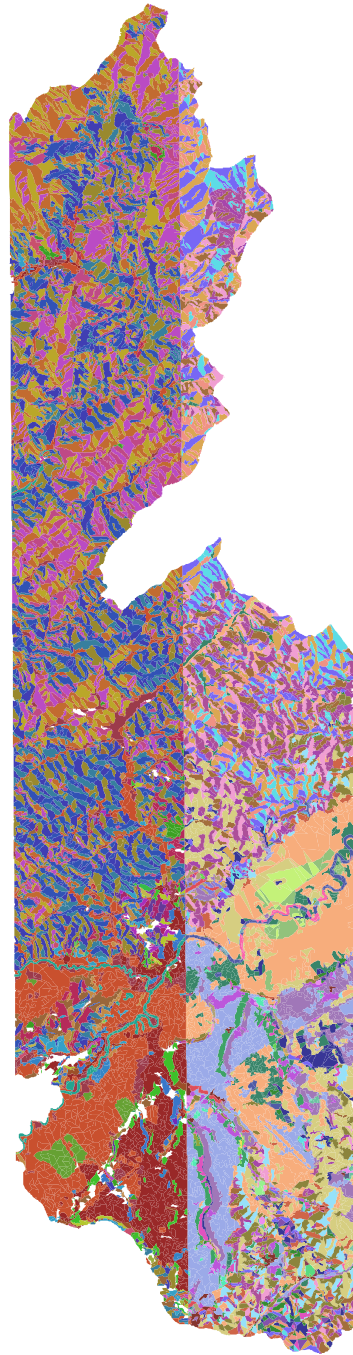


FIGURA 4.4 - Mapa de estratos da área de estudo.

possuir projeção ortogonal e dispensar o uso de um novo georeferenciamento (*rubber sheeting*), sendo necessários, portanto, apenas ajustes (translação e/ou rotação) que não envolvam correções de erros causados por distorção geométrica.

É importante ressaltar que o processo de transformação geométrica foi realizado na área centro-sul da imagem (Figura 3.10), correspondente à região abrangida pelo levantamento DGPS, pois esta era a única região que permitia a identificação de feições geográficas no MDT. Devido ao relevo montanhoso (Figura 4.1) e uma maior ocorrência de florestas (Figura 4.3), não foi possível utilizar nenhuma referência na região norte para auxiliar na transformação geométrica do MDT.

Foram realizadas diversas tentativas de translação e rotação a fim de se encontrar os melhores resultados de ajuste visual. O MDT corrigido foi obtido por duas operações de transformação geométrica no MDT original. A primeira operação consistiu em uma translação de 178,297 m com azimute de 146,923°. A seguir, foi aplicada uma rotação final de 0,2° para refinar a orientação. Para a rotação foi empregada o método de reamostragem por vizinho mais próximo.

A Figura 4.5 mostra algumas regiões onde o levantamento DGPS é sobreposto ao MDT original e ao corrigido. As regiões nas cores verde e vermelho possuem, respectivamente, os menores e os maiores valores de altitude na área representada. É perceptível a diferença entre o MDT original e o levantamento DGPS das vias terrestres (linhas pretas), sendo possível notar a mudança obtida com o ajuste do MDT original.

Para verificar a qualidade da correção geométrica, foi criado um *buffer* com 6 km de largura em ambos os lados da Rodovia BR-116. A seguir, os erros de cada estrato foram divididos em dois conjuntos: os localizados dentro e fora do *buffer*. Foi utilizado o teste de Mann-Whitney para verificar se os dois conjuntos de cada estrato possuíam estatisticamente os mesmos erros médios e o teste de Levene para avaliar se a variância entre os grupos eram iguais. Não foram encontradas diferenças significativas para os estratos testados, indicando que, em geral, não há diferenças entre os erros localizados dentro e fora do *buffer* e provavelmente espera-se que os resultados obtidos em qualquer área do MDT tenha o mesmo nível de confiabilidade. Nem todos os estratos puderam ser analisados, pois em alguns casos não havia uma quantidade suficiente de pontos para uma avaliação estatística em ambos os conjuntos, como por exemplo nos estratos montanhosos, predominantemente localizados

na área fora do *buffer*. Os resultados dos testes não são apresentados neste trabalho.

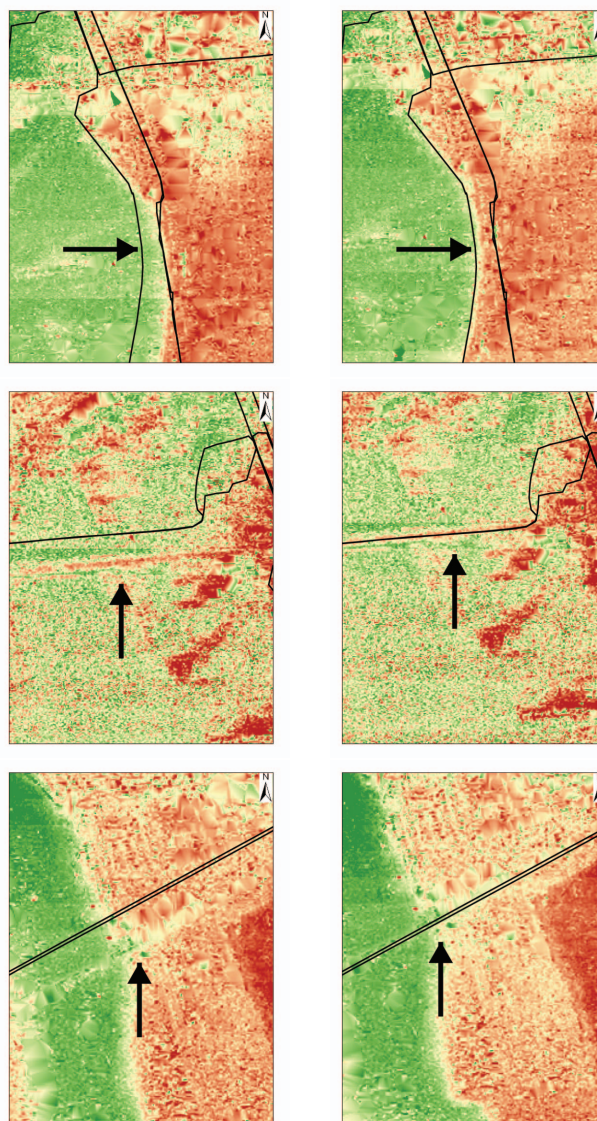


FIGURA 4.5 - MDT original (esquerda) e corrigido (direita) com levantamento DGPS (linha preta). Escala aproximada de 1:35.000.

4.3 Análise Visual

A primeira área analisada foi a da planície do Rio Paraíba do Sul, onde se encontra um relevo com gradiente de declividade plano e uma cobertura vegetal rasteira (com influência nula do relevo e do uso/cobertura do solo). A [Figura 4.6](#) apresenta a região selecionada, localizada na região do alcance próximo. É possível observar a homogeneidade da área pela textura uniforme da cena, não se identificando nenhum

tipo de anomalia.



FIGURA 4.6 - Relevo sombreado da planície do Rio Paraíba do Sul.

No canto superior esquerdo da [Figura 4.6](#) é possível verificar a ocorrência de uma feição curva e com textura mais lisa. Esta feição pode ser melhor visualizada na [Figura 4.7](#). Trata-se de um meandro do Rio Paraíba do Sul (indicado pela seta vermelha). A textura lisa é característica de uma região suavemente interpolada. A ausência de informação da feição fluvial decorre do seu fluxo hídrico de baixa velocidade agindo como uma superfície especular, não provocando o retroespalhamento do sinal. Efeito similar ocorre com o ambiente lacustre localizado a noroeste (seta branca). Ainda nesta imagem é possível identificar o talude delineando o traçado horizontal de uma ferrovia (seta amarela), que se destaca no relevo plano do local. Não foi encontrado nenhum deslocamento transversal ao longo do perfil longitudinal desta ou de outras (como por exemplo a Rodovia BR-116) feições lineares.

Como esperado, foram encontradas grandes áreas interpoladas (em cinza escuro na [Figura 4.8](#)) na região da Serra da Mantiqueira, causado pelo sombreado nas faces dorsais das vertentes. A grande presença de regiões interpoladas é provocada pelo grande ângulo de incidência da geometria de imageamento. Aproximadamente

27,70% da área do MDT é interpolada.

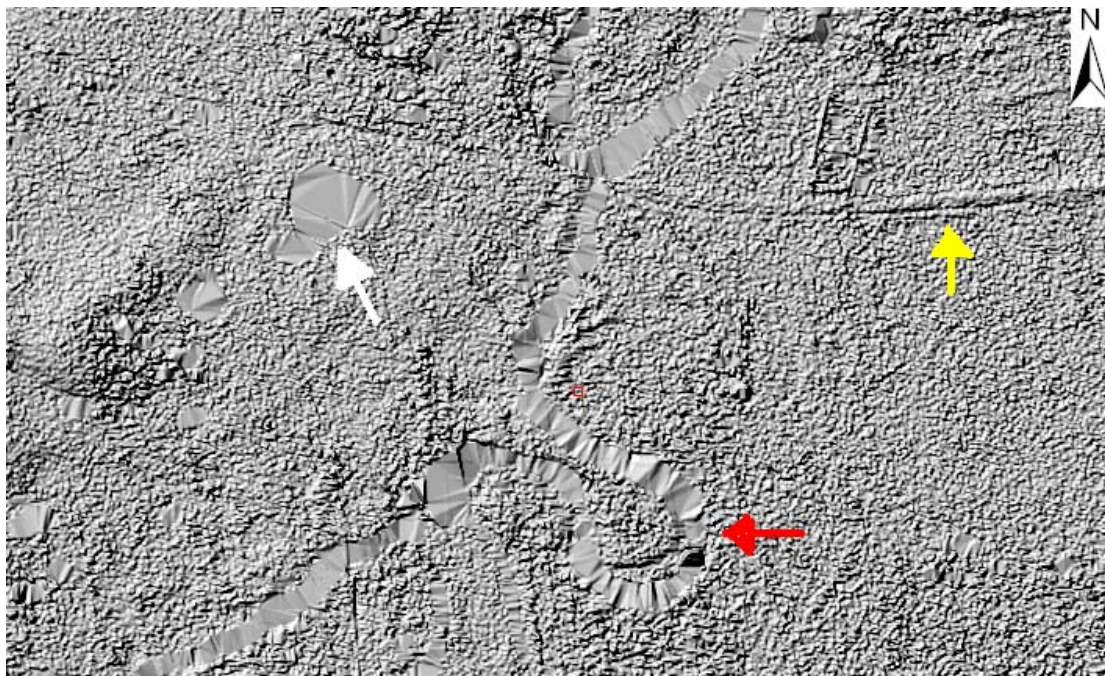


FIGURA 4.7 - Relevo sombreado da várzea do Rio Paraíba do Sul com o talude da ferrovia (seta amarela), lago (seta branca) e o Rio Paraíba do Sul (seta vermelha).

Há um tipo específico de região interpolada encontrada no MDT que é mais problemática que aquelas anteriormente mencionadas (Figura 4.9). Esta interpolação ocorre ao redor de uma “ilha” cercada por sombras. As altitudes dos elementos da “ilha” podem ser anômalas em relação à vizinhança não interpolada, tendo sido causada pelo seu isolamento durante o processo de desdobramento da fase. Foram encontradas várias ocorrências deste tipo de erro, com maior predominância nas regiões montanhosas.

Pela análise visual da [Figura 3.4](#), parece não ter ocorrido nenhum problema na construção do mosaico. Este tipo de problema ocorre quando há blocos com *offsets* diferentes nos valores de altitude, não permitindo um ajuste adequado de todo o conjunto.

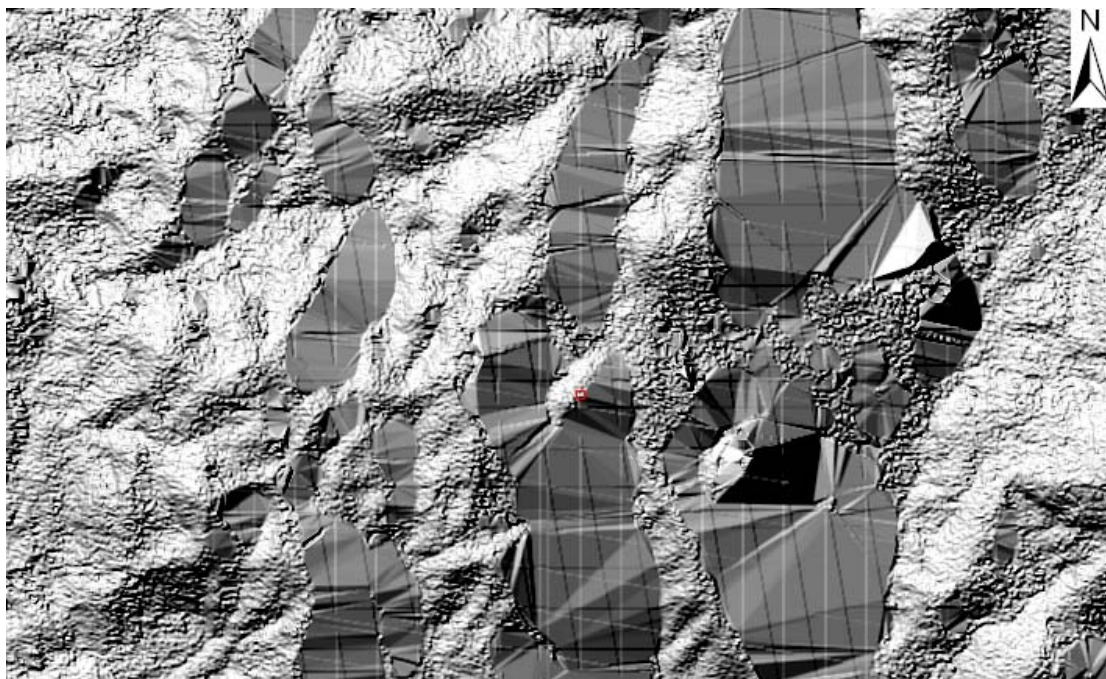


FIGURA 4.8 - Relevo sombreado da Serra da Mantiqueira.

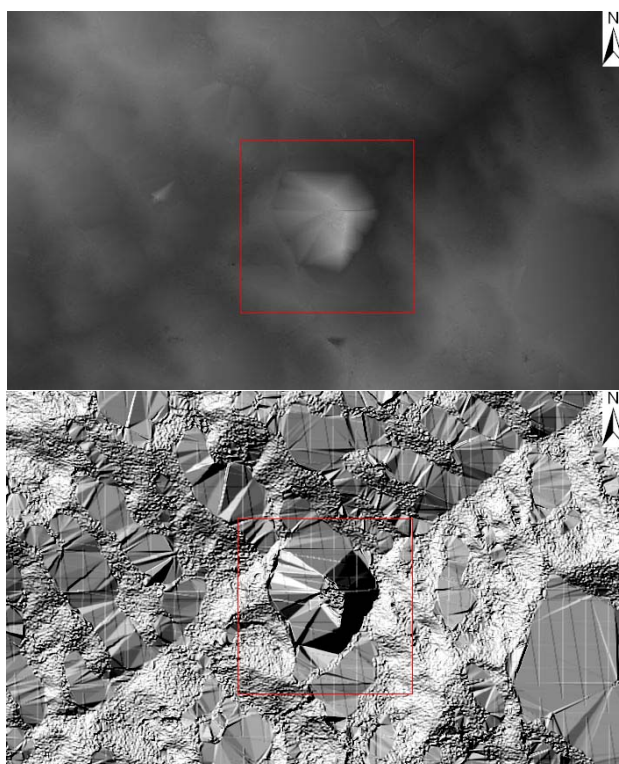


FIGURA 4.9 - "Ilha" no MDT (acima) e na imagem sombreada (abaixo).

4.4 Detecção e Remoção de *Outliers*

Para a análise dos possíveis *outliers* (observações discrepantes que se distanciam das demais) foram empregados *box plots*, representando os erros de cada estrato. Conforme ilustrado nas Figuras 4.10 (para os estratos localizados no alcance próximo) e 4.11 (para os estratos localizados no alcance distante), foram encontrados os *outliers* descritos na Tabela 4.1.

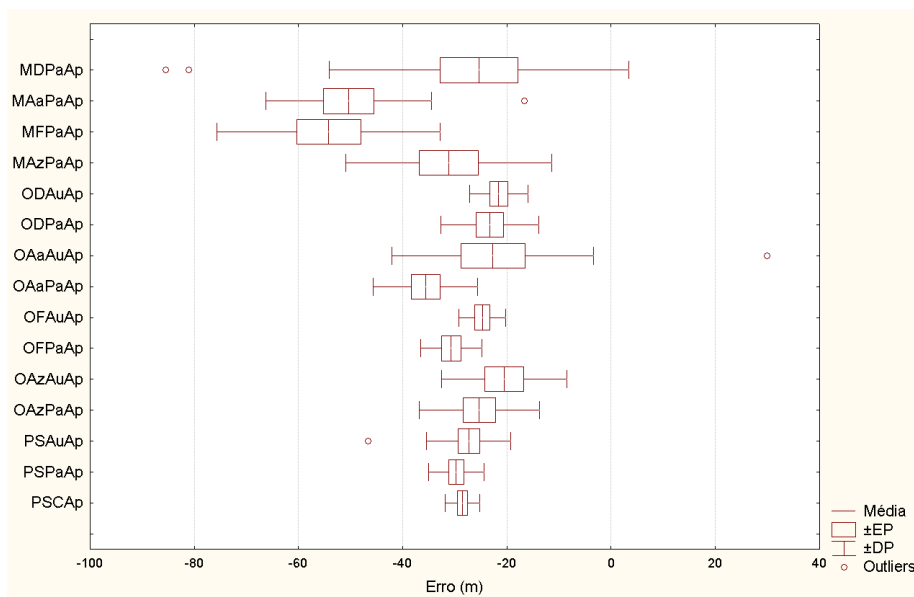


FIGURA 4.10 - *Box plots* dos erros dos estratos no alcance próximo.

A 3^a coluna da Tabela 4.1 apresenta o valor encontrado do erro para cada ponto. A razão representa a relação entre a variância da melhor e a da segunda melhor solução obtida no processamento GPS. Quanto maior este valor, mais confiável é a solução. A variância de referência indica a relação entre a solução observada *a posteriori* e a esperada (*a priori*). Quanto menor o resultado, mais próxima está a solução do esperado. Em termos práticos, são consideradas suspeitas as soluções que têm razão inferior a 3 ou variância de referência superior a 10 (Trimble, 2001).

Os pontos E00516 e E05917 foram levantados em topos de edifícios. Por dificuldade

de instalação dos tripés, devido à presença de ventos fortes, foi necessário estacioná-los em locais que propiciassem uma melhor estabilidade. Isto impediu que os tripés fossem instalados nos centros das coberturas dos edifícios. A Figura 4.12 mostra a proximidade destes pontos com a borda da cobertura, com distância inferior à dimensão do *pixel* do MDT (5 m).

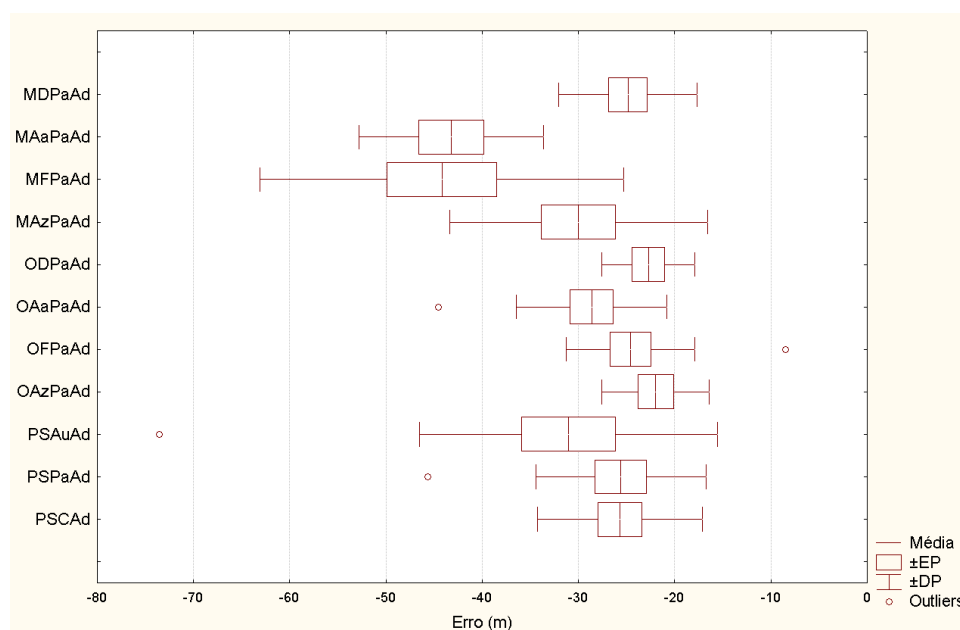


FIGURA 4.11 - *Box plots* dos erros dos estratos no alcance distante.

TABELA 4.1 - *Outliers* detectados com o uso de *box plots*.

Ponto	Estrato	Erro (m)	Razão	Variância de referência	Removido
E00516	PISAuAp	-46,669	31,3	1,957	sim
E02317	OAaAuAp	29,928	10,1	4,671	não
E04518	MAaPaAp	-16,648	12,9	2,983	não
E05118	MDPaAp	-81,031	18,9	3,424	não
E05119	MDPaAp	-85,472	15,7	3,567	não
E05706	PISPaAd	-45,682	13,4	5,037	não
E05917	PISAuAd	-73,512	9,4	5,002	sim
E06922	OPPaAd	-8,510	15,3	2,246	não
E07523	OAaPaAd	-44,532	7,5	6,687	não



FIGURA 4.12 - Pontos E00516 (esquerda) e E05917 (direita) sendo levantados.

Apesar de apresentarem resultados satisfatórios nas observações (como observado na [Tabela 4.1](#)) os pontos E00516 e E05917 foram removidos por estarem muito próximos às bordas dos edifícios. Após a remoção destes *outliers* foi realizada uma análise dos valores mínimos e máximos dos erros ([Tabela 4.2](#)).

TABELA 4.2 - Estatística descritiva por estrato após a remoção dos *outliers* detectados.

Estrato	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
PISCAp	-28,573	-34,925	-24,186	3,319
PISPaAp	-29,732	-37,894	-20,115	5,291
PISAuAp	-27,322	-46,669	-17,348	8,111
OAzPaAp	-25,315	-45,591	-6,400	11,575
OAzAuAp	-20,519	-39,250	1,249	11,967
OFPaAp	-30,719	-40,820	-21,361	5,892
OFAuAp	-24,717	-30,215	-15,140	4,502
OAApPaAp	-35,630	-55,062	-24,092	10,066
OAApAuAp	-22,684	-36,169	29,928	19,346
ODPaAp	-23,277	-36,519	-5,073	9,398
ODAuAp	-21,558	-30,264	-10,862	5,619
MAzPaAp	-31,174	-55,140	0,983	19,731
MFPaAp	-54,206	-93,926	-24,908	21,406
MAaPaAp	-50,393	-70,104	-16,646	15,941
MDPaAp	-25,334	-85,472	22,144	28,766

(continua)

TABELA 4.2 - Conclusão.

Estrato	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
PISCAd	-25,692	-40,833	-12,468	8,598
PISPaAd	-25,583	-45,682	-12,872	8,845
PISAuAd	-31,028	-73,512	-19,808	15,464
OAzPaAd	-21,978	-33,580	-15,572	5,583
OFPaAd	-24,572	-31,021	-8,510	6,687
OAPaAd	-28,638	-44,532	-18,796	7,840
ODPaAd	-22,739	-29,070	-14,370	4,866
MAzPaAd	-30,010	-55,628	-13,295	13,401
MFPaAd	-44,171	-65,611	-10,161	18,897
MAAPaAd	-43,193	-63,536	-33,884	9,588
MDPaAd	-24,866	-38,476	-13,905	7,174

Foram verificados os 4 pontos com maiores erros positivos (estratos OAaAuAp e MDPaAp) e negativos (estratos MFPaAp e MDPaAp). Os resultados obtidos no processamento GPS destes pontos são apresentados na tabela [Tabela 4.3](#).

Como é possível observar na [Tabela 4.3](#), nenhum dos pontos apresentou valores inadequados de razão e/ou variância de referência. Nenhum dos 4 pontos se encontram em regiões problemáticas do MDT (como por exemplo “ilhas”). Portanto não há justificativas para removê-los do conjunto de amostras. Após a remoção dos *outliers*, restaram 295 pontos em condições adequadas para a avaliação altimétrica.

TABELA 4.3 - Pontos com valores de erros máximos e mínimos suspeitos.

Ponto	Estrato	Erro (m)	Razão	Variância de referência	Removido
E02317	OAaAuAp	29,928	10,1	4,671	não
E03916	MFPaAp	-93,923	12,3	5,788	não
E05116	MDPaAp	22,144	8,9	4,776	não
E05119	MDPaAp	-85,472	15,7	3,567	não

4.5 Avaliação Cartográfica Tradicional

Com os erros dos 295 pontos foi realizado um teste de normalidade, cujo resultado (valor- p) é mostrado na [Figura 4.13](#).

O histograma dos erros não aparenta ter uma distribuição próxima da curva normal

esperada (linha vermelha). A verificação visual é corroborada pelo fato da hipótese nula ter sido rejeitada pelo teste de Shapiro-Wilks (como pode ser observado pelo valor- p de aproximadamente zero apresentado na [Figura 4.13](#)), ou seja, a distribuição dos erros não pode ser considerada normal a um nível de significância de 5%.

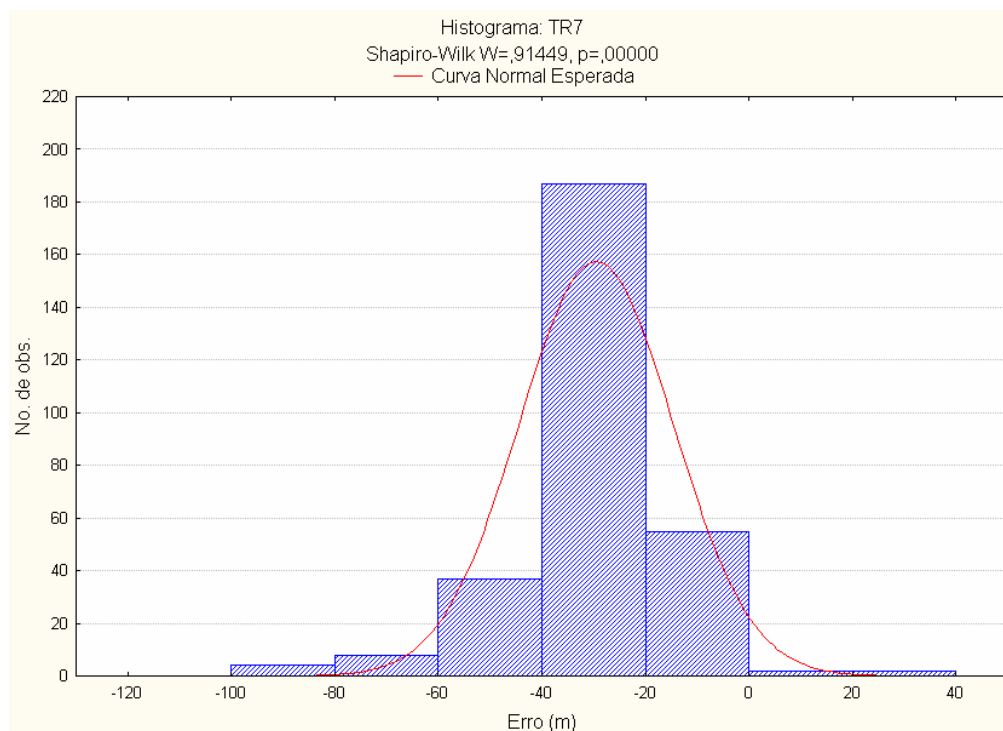


FIGURA 4.13 - Histograma dos erros com resultado do teste Shapiro-Wilk para o MDT corrigido.

Para se determinar a acurácia vertical absoluta, foram determinados os valores do RMSE e $1,96 \times \text{RMSE}$. Os erros oriundos do MDT corrigido apresentaram RMSE de 33,078 m. Se os erros do MDT corrigido possuísem distribuição normal, poder-se-ia afirmar que o MDT corrigido teria uma acurácia vertical absoluta de 64,832 m, com um nível de confiança de 95%. Diferentemente do NSSDA, o PEC não faz referência à normalidade dos erros da amostra para a validação de produtos cartográficos como o MDT.

Os resultados obtidos na análise de tendência são apresentados na [Tabela 4.4](#). Como era esperado (devido ao resultado do erro médio obtido da estatística descritiva), a hipótese nula foi rejeitada a um nível de significância de 5%, mostrando que o MDT não pode ser considerado livre de tendências significativas.

TABELA 4.4 - Estatística descritiva e resultado da análise de tendência.

Estatística	Resultado
Erro médio	-29,515
Desvio-padrão	14,959
Valor- p	$1,5 \times 10^{-103}$

A análise de precisão foi realizada considerando o desvio-padrão amostral igual ao erro-padrão, conforme CONCAR (2007). Inicialmente, determinou-se o valor da equidistância do MDT, baseado nas amostras. De acordo com o PEC altimétrico, tem-se para a classe A (Tabela 2.3)

$$eq = 3 \times EP = 3 \times 14,959 = 44,877m$$

A seguir foi determinada qual é a maior escala oficial, cuja equidistância seja imediatamente maior que a da amostra, para testar as hipóteses formuladas na equação Equação 3.5. De acordo com a Tabela 2.4, a escala mais próxima seria 1:100.000. O teste de precisão foi então conduzido de acordo com a escala citada. Para a equidistância oficial na escala 1:100.000, têm-se que

$$EP_{PEC} = \frac{eq}{3} = \frac{50}{3} = 16,667m$$

Utilizando-se os valores encontrados (eq e EP) foi possível encontrar o valor- p de 0,994 de acordo com as hipóteses expressas na equação 3.5. Não ocorreu um resultado significativo a um nível de significância de 5%, sendo aceita a hipótese nula de que o erro-padrão do MDT é estatisticamente menor que o erro-padrão especificado pelo PEC. Portanto, não há razões para se duvidar que o MDT atenda a escala de 1:100.000 (classe A), depois de removida a tendência (*offset*) e realizada a correção geométrica do MDT original.

4.6 Análise de Regressão

Depois da remoção dos *outliers* foram realizadas as análises de regressão dos MDTs original e corrigido (transladado e rotacionado em relação ao original). As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os diagramas de dispersão determinados para a altitude do MDT (original e corrigido) versus a altitude GPS.

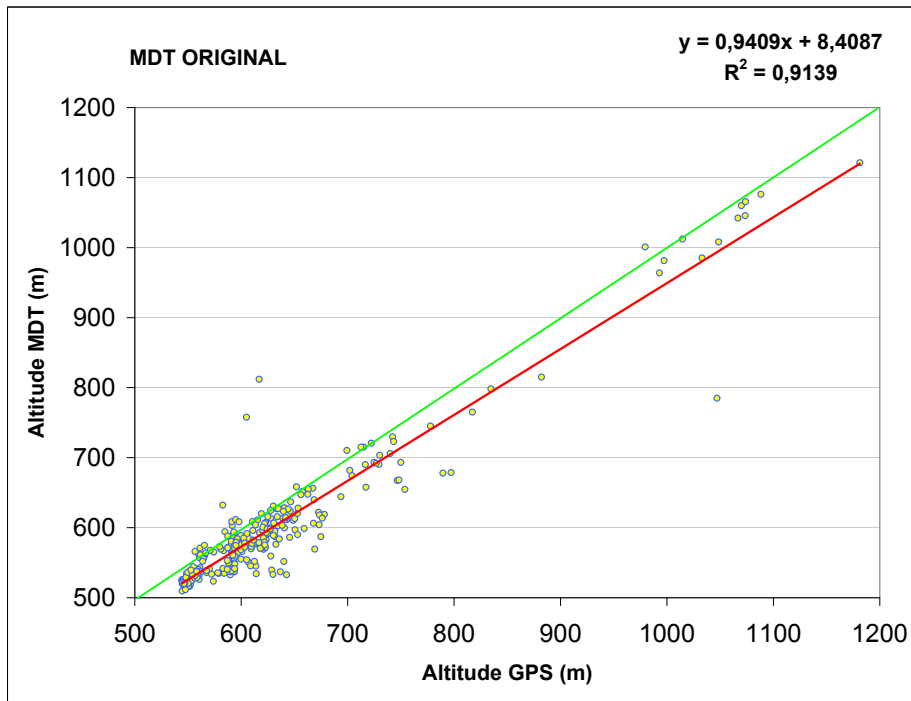


FIGURA 4.14 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT original com as retas de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.

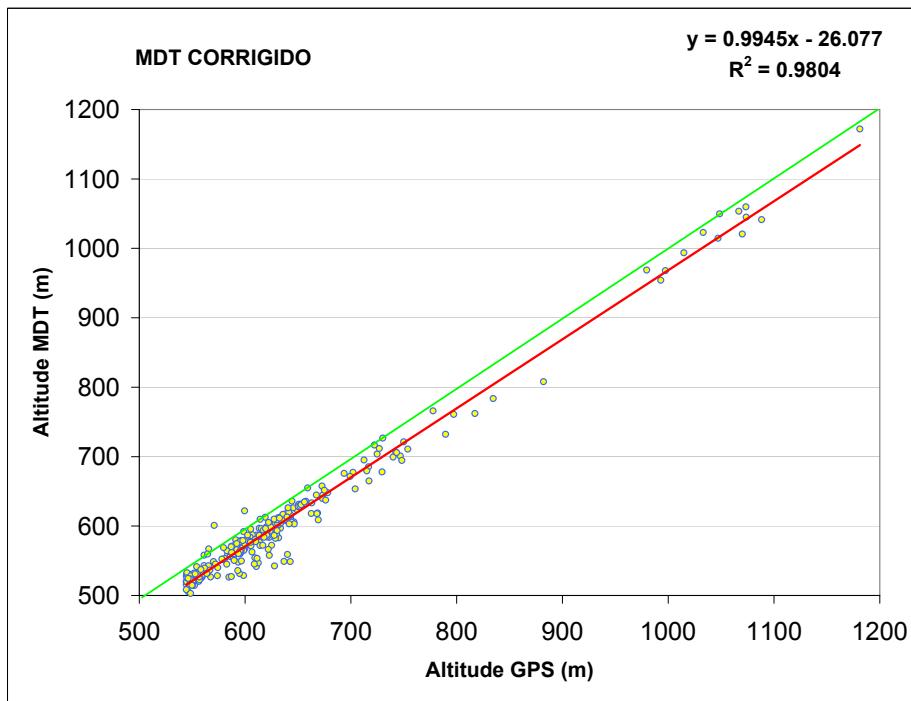


FIGURA 4.15 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT corrigido com a reta de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.

É possível notar que as observações se encontram mais dispersas em relação a reta de regressão no MDT original que no corrigido, com ocorrência de vários *outliers* (pontos mais afastados da reta). Isto está provavelmente associado ao deslocamento geométrico do MDT original.

Observa-se na [Tabela 4.5](#) que a correção da orientação geométrica do MDT corrigido permitiu que houvesse um melhor ajuste da reta de regressão em relação ao MDT original, como pode ser observado pelo valor de R^2 e pela aceitação da hipótese nula de que $\beta_1 = 1$ (valor- p não significativo), o que não ocorre com o MDT original. A aceitação do teste estatístico para verificar se $\beta_1 = 1$ indica que a reta de regressão estimada é paralela à reta de regressão ideal ($y = x$), significando que a altitude do MDT é diretamente proporcional aquela medida pelo GPS, se removido o valor do *offset* (β_0).

TABELA 4.5 - Resultados da regressão linear simples com valores- p dos coeficientes de regressão.

MDT	R^2	b_0	b_1	$\beta_0 = 0$ (valor- p)	$\beta_1 = 1$ (valor- p)
Original	0,914	8,409	0,941	0,437	$5,39 \times 10^{-4}$
Corrigido	0,980	-26,077	0,995	$1,23 \times 10^{-6}$	0,506

A reta de regressão do MDT original passa pela origem, como indicado na aceitação da hipótese nula que $\beta_0 = 0$ ([Tabela 4.5](#)), porém não tem uma inclinação adequada, tendo erros maiores para áreas montanhosas, como pode ser observado nos valores acima de 900 m de altitude na [Figura 4.14](#). O MDT corrigido apresenta uma tendência de subestimação constante para todos os valores ([Figura 4.15](#)).

Foi então determinado o valor da tendência, a fim de removê-la antes da realização de análises posteriores. A tendência possui uma componente global, comum a todos os estratos, e uma componente específica para cada estrato. Para se determinar o valor da componente global, considerou-se que os estratos pastagem com gradiente de declividade plano tenham a componente específica nula, pois não há influência do relevo e a cobertura (capim) é normalmente muito próxima do solo.

O valor da componente global da tendência foi considerado como sendo a média dos módulos dos erros dos estratos PISP a Ap e PISP a Ad (totalizando 24 pontos), ou seja, 27,83 m. Este valor foi adicionado a todos os erros de cada estrato, removendo a componente global da tendência e restando apenas a componente da tendência específica para cada estrato. O valor do RMSE para todos os pontos reduziu de

33,078 m para 15,029 m.

Após a remoção da tendência, foram gerados novos diagramas de dispersão para os MDTs original (Figura 4.16) e corrigido (Figura 4.17). É possível observar em ambos os gráficos o deslocamento da reta de regressão estimada para uma posição mais próxima da reta de regressão ideal, devido à remoção da tendência.

A Tabela 4.6 apresenta os intervalos de confiança para β_0 e β_1 simultaneamente ($1 - \alpha = 90\%$), antes e depois da remoção da tendência. É possível observar que para o MDT original, apenas o intervalo de confiança para β_0 contém o valor nulo e a remoção da tendência alterou este resultado. Já para o MDT corrigido, antes da remoção da tendência, apenas o intervalo de confiança de β_1 continha o valor 1. Com a remoção da tendência, os intervalos de confiança do MDT corrigido, passaram a conter $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$ simultaneamente ($\alpha = 10\%$), significando um melhor ajuste deste MDT em relação aos demais.

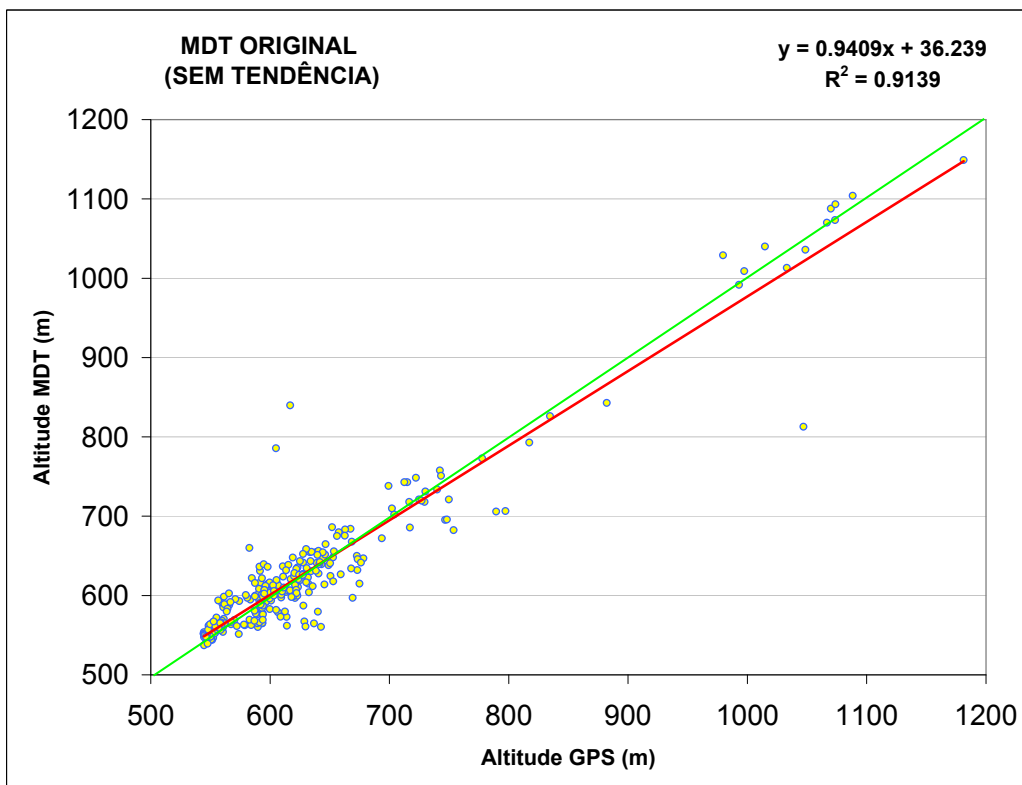


FIGURA 4.16 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT original, após a remoção da tendência, com as retas de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.

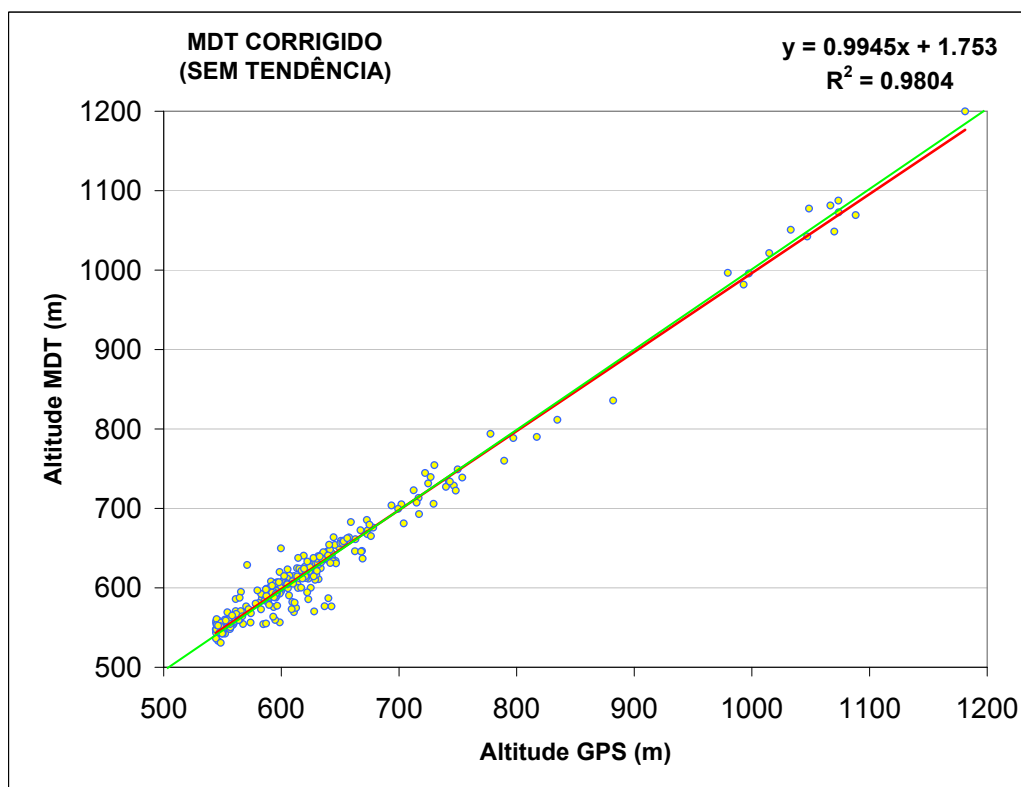


FIGURA 4.17 - Diagrama de dispersão das altitudes do MDT corrigido, após a remoção da tendência, com as retas de regressão estimada (vermelho) e ideal (verde), o coeficiente de determinação e a equação da reta.

TABELA 4.6 - Intervalos de confiança simultâneos para β_0 e β_1 , baseados no procedimento de Bonferroni ($\alpha = 10\%$).

MDT	β_0	β_1
Original com tendência	$-15,967 \leq \beta_0 \leq 32,785$	$0,903 \leq \beta_1 \leq 0,979$
Original sem tendência	$11,863 \leq \beta_0 \leq 60,615$	$0,903 \leq \beta_1 \leq 0,979$
Corrigido com tendência	$-37,940 \leq \beta_0 \leq -14,214$	$0,977 \leq \beta_1 \leq 1,013$
Corrigido sem tendência	$-10,110 \leq \beta_0 \leq 13,616$	$0,977 \leq \beta_1 \leq 1,013$

4.7 Análise por Estratos

Após a remoção da componente global da tendência, foi realizada uma análise individual de cada uma das categorias que compõem os estratos analisados neste trabalho: gradiente de declividade, aspecto, uso/cobertura do solo, região da imagem na dimensão em alcance.

Na [Figura 4.18](#) estão apresentados os diagramas de dispersão dos erros (na abscissa) em função da altitude GPS (na ordenada). É possível observar pelos diagramas de dispersão dos erros para a categoria de gradiente de declividade, que a classe plana possui uma menor dispersão que as outras classes (variando aproximadamente entre -20 e 20 m), com uma distribuição dos erros centrada próxima ao valor zero e ocorrendo entre as altitudes de 500 a 750 m.

A classe ondulada possui uma dispersão intermediária em relação as outras classes (com uma variação aproximada entre -30 e 60 m), com uma distribuição dos erros deslocada levemente para a direita (apresentando uma tendência a superestimar as altitudes) e com ocorrência entre as altitudes de 500 a 750 m (como a classe plana).

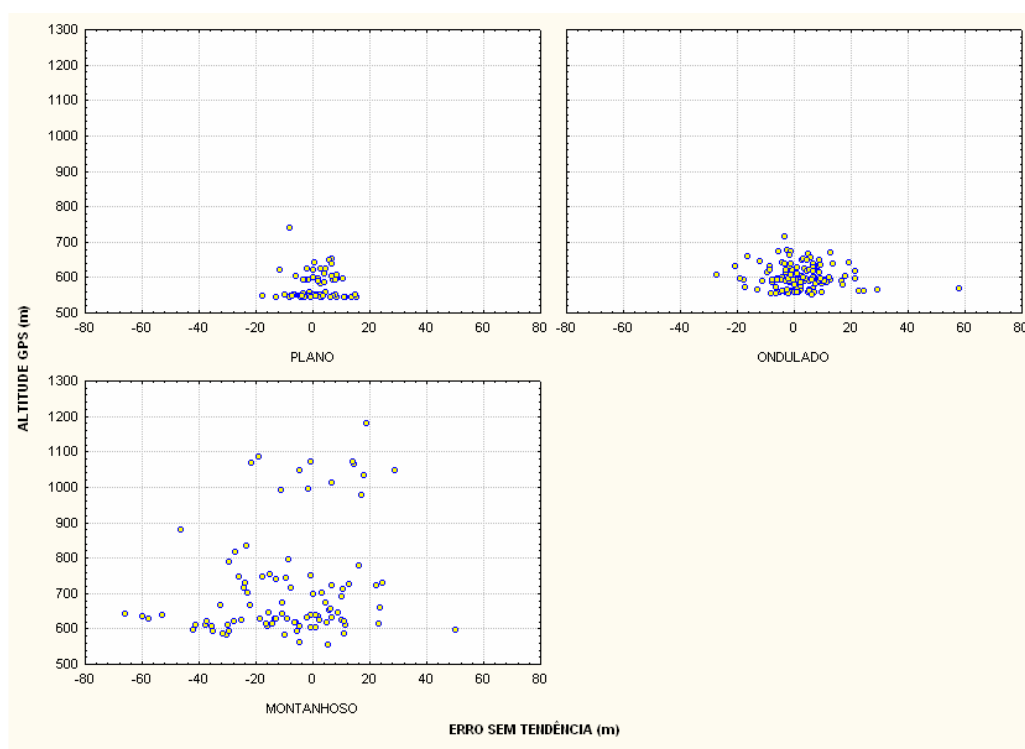


FIGURA 4.18 - Diagramas de dispersão dos erros do MDT corrigido da componente global da tendência para a categoria gradiente de declividade.

Já a classe montanhosa tem maior dispersão que as outras classes (aproximadamente variando de -70 a 50 m), com uma distribuição dos erros deslocada do valor nulo

para a esquerda (mostrando uma tendência a subestimar as altitudes) e ocorrendo entre as altitudes de 550 a 1200 m. Uma das causas é que são esperados erros maiores em gradientes de declividade mais acentuados, principalmente pelo incremento das distorções geométricas nas imagens de radar, que ocorrem com maior intensidade com dados de sensores aerotransportados (maior ângulo de incidência) do que com os orbitais (Gens, 1998).

A [Figura 4.19](#) ilustra os diagramas de dispersão dos erros do MDT versus a altitude medida por GPS para as classes de aspecto. Pelos diagramas é possível notar que a classe sem aspecto apresenta a menor dispersão e não apresenta tendência. A classe dorsal apresenta a maior dispersão, tendendo a superestimar as altitudes, em oposição à classe frontal que tende a subestimar as altitudes.

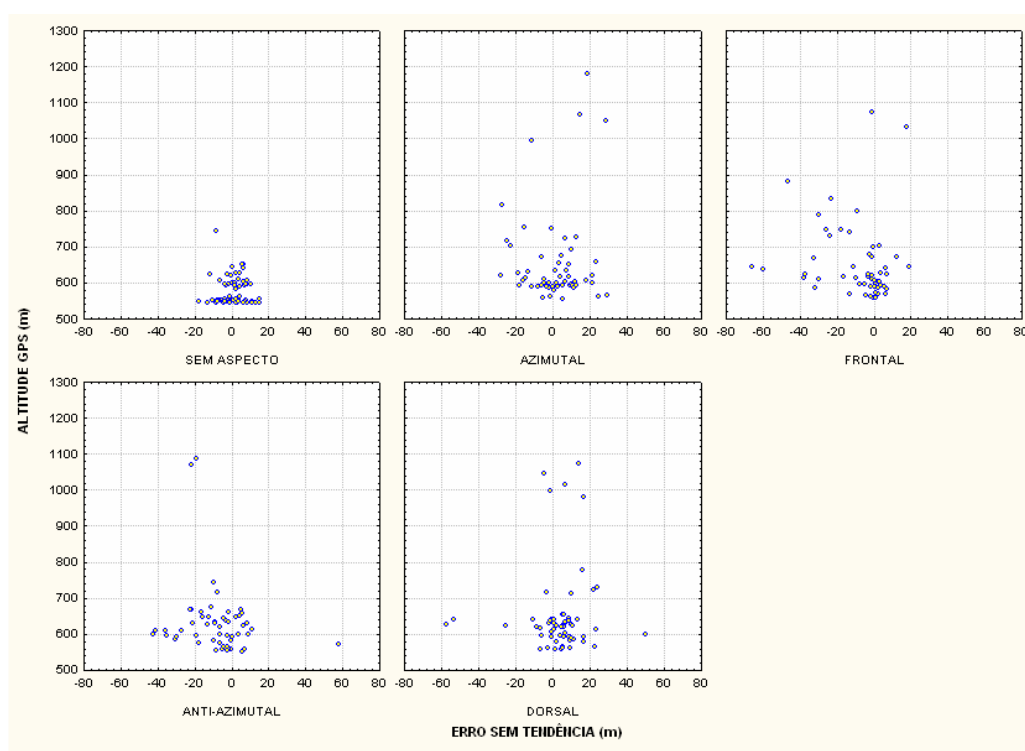


FIGURA 4.19 - Diagramas de dispersão dos erros da categoria aspecto, corrigidos da componente global da tendência.

Os diagramas de dispersão da categoria uso/cobertura do solo ([Figura 4.20](#)) per-

mitem identificar que a classe cultura tem uma distribuição centrada no valor nulo, com uma distribuição quase simétrica em relação à altitude de 550 m. Isto se deve ao fato de todos estes pontos estarem situados na Várzea do Rio Paraíba do Sul. A classe pastagem possui a maior dispersão, tendendo a subestimar as altitudes. A classe área urbana possui uma dispersão menor que a classe pastagem, tendendo a superestimar as altitudes. O motivo da classe pastagem ter apresentado um resultado inferior às outras classes, se deve a condição de ser a única presente em gradiente de declividade montanhoso, que possui um alto valor de erro médio.

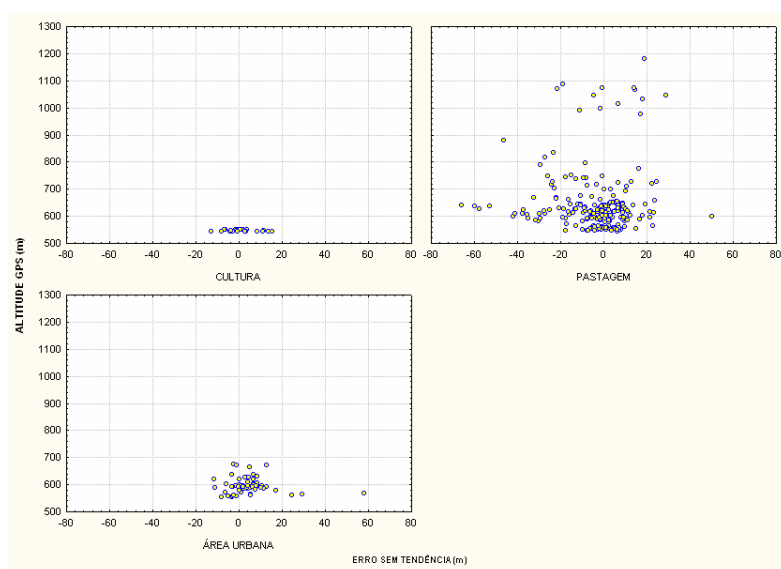


FIGURA 4.20 - Diagramas de dispersão dos erros da categoria de uso/cobertura do solo, corrigidos da componente global da tendência.

A categoria de região da imagem em alcance apresentou um resultado diferente do esperado, conforme apresentado na [Figura 4.21](#). A classe alcance próximo tem uma maior dispersão que a classe alcance distante. Isto provavelmente ocorre pelo fato de haver uma maior ocorrência de gradiente de declividade montanhoso no alcance próximo.

Como observado nas classes pastagem e alcance próximo (em relação a classe montanhosa), há interação entre as categorias, o que justifica a análise por estratos. A análise individual de cada categoria, sem considerar esta interação, pode resultar em

conclusões errôneas.

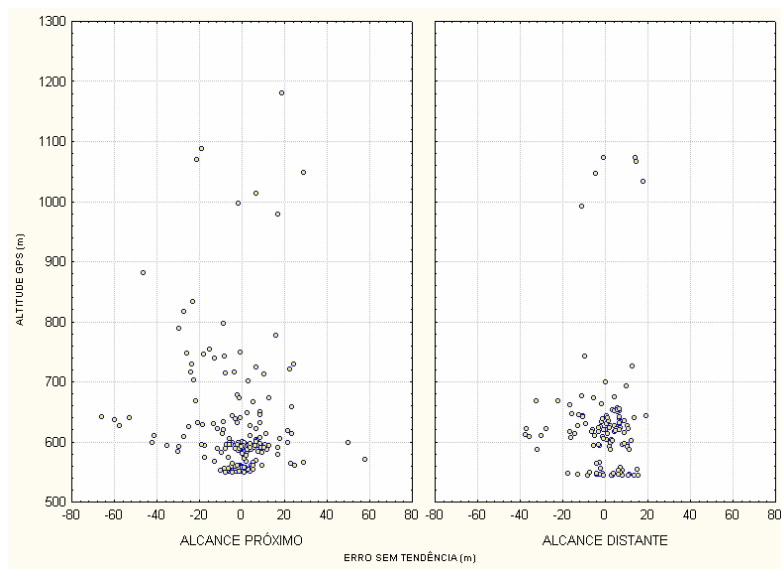


FIGURA 4.21 - Diagramas de dispersão dos erros da categoria de região da imagem na dimensão em alcance, corrigidos da componente global da tendência.

Inicialmente foi realizado o teste Shapiro-Wilk para determinar se os erros dos estratos apresentavam distribuição normal. A maioria dos erros dos estratos apresentou normalidade a um nível de significância de 5%, com exceção dos estratos OAaAuAp e OFPaAd (valores- p de 0,000 e 0,044, respectivamente).

A [Figura 4.22](#) apresenta os *box plots* para cada estrato, com os erros já corrigidos da componente global da tendência. É possível observar que a maioria dos erros médios dos estratos passaram a estar mais próximos do valor nulo, após a remoção da componente global. A maioria dos estratos com gradiente de declividade montanhoso (MAzPaAp, MFPaAp, MAaPaAp, MAzPaAd, MFPaAd e MAaPaAd) apresenta valores de erros médios negativos, como pode ser observado na [Tabela 4.7](#).

Pode ser visualizado na [Figura 4.23](#), que apresenta os *box plots* dos erros dos estratos com valores absolutos, que a maioria dos erros dos estratos montanhosos possuem uma maior dispersão que os demais estratos (MFPaAp, MAaPaAp, MDPaAp, MFPaAd e MAaPaAd). Os estratos que visualmente apresentam menor dispersão

são os estratos com gradiente de declividade plano (PISCAP, PSPaAp, PSAuAp, PISAuAd).

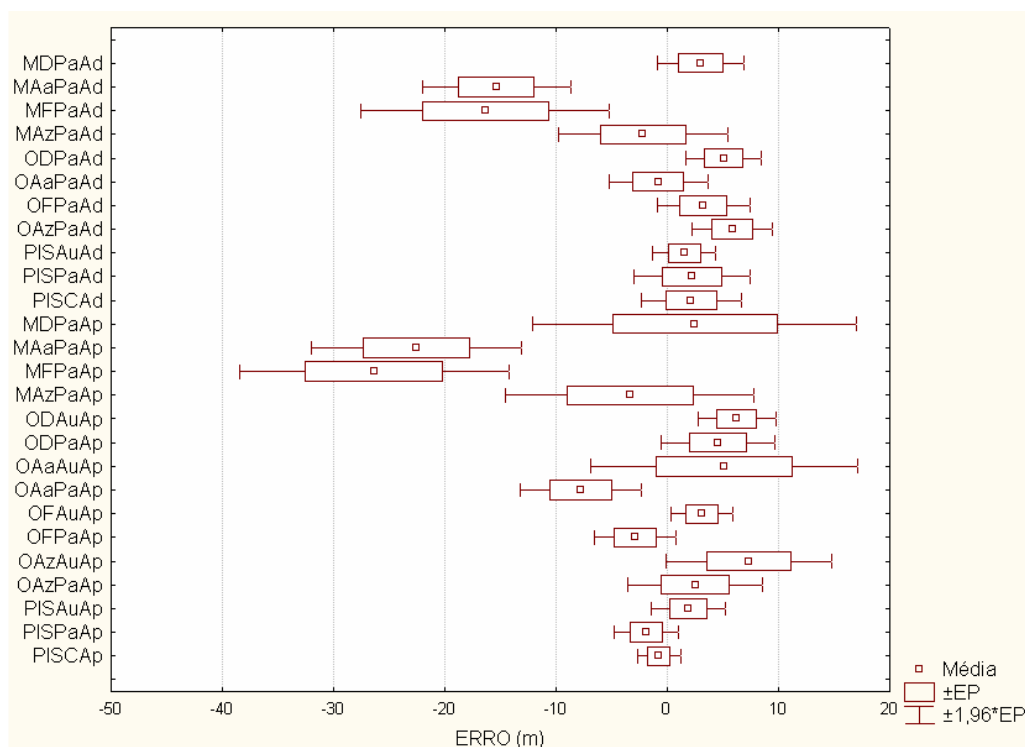


FIGURA 4.22 - Box plots dos erros dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.

TABELA 4.7 - Estatística descritiva dos erros por estrato.

Estrato	n	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
PISCAP	11	-0,743	-7,095	3,644	3,319
PISPaAp	13	-1,902	-10,064	7,715	5,291
PISAuAp	14	1,890	-11,521	10,482	6,324
OAzPaAp	14	2,515	-17,761	21,430	11,575
OAzAuAp	10	7,311	-11,420	29,079	11,967
OFPaAp	10	-2,889	-12,990	6,469	5,892
OFAuAp	10	3,113	-2,385	12,690	4,502

(continua)

TABELA 4.7 - Conclusão.

Estrato	n	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
OAApPaAp	13	-7,800	-27,232	3,738	10,066
OAApAuAp	10	5,146	-8,339	57,758	19,346
ODPaAp	13	4,553	-8,689	22,757	9,398
ODAuAp	10	6,272	-2,434	16,968	5,619
MAzPaAp	12	-3,344	-27,310	28,813	19,731
MFPaAp	12	-26,376	-66,096	2,922	21,406
MAaPaAp	11	-22,563	-42,274	11,184	15,941
MDPaAp	15	2,496	-57,642	49,974	28,766
PISCAd	14	2,138	-13,003	15,362	8,598
PISPaAd	11	2,247	-17,852	14,958	8,845
PISAuAd	9	1,523	-3,364	8,022	4,285
OAzPaAd	9	5,852	-5,750	12,258	5,583
OFPaAd	10	3,258	-3,191	19,320	6,687
OAApPaAd	12	-0,808	-16,702	9,034	7,840
ODPaAd	8	5,091	-1,240	13,460	4,866
MAzPaAd	12	-2,180	-27,798	14,535	13,401
MFPaAd	11	-16,341	-37,781	17,669	18,897
MAaPaAd	8	-15,363	-35,706	-6,054	9,588
MDPaAd	13	2,964	-10,646	13,925	7,174

O Apêndice D apresenta uma variação dos *box plots* ilustrados na análise por estratos, com o comprimento do retângulo representando os quartis inferior (ou percentil 25) e superior (ou percentil 75) e a mediana como medida de tendência central.

O estrato OAApPaAp apresenta uma alta dispersão ([Figura 4.23](#)) se comparado aos demais estratos com gradiente de declividade ondulado. Isto ocorre pela presença do ponto E02317 com um erro de 29,928 m. Como já mencionado anteriormente, não houve motivos que justificassem a sua remoção.

As Tabelas [4.7](#) e [4.8](#) apresentam a estatística descritiva para os erros em cada estrato, sendo possível observar que após a correção geométrica do MDT original e da remoção dos pontos com solução flutuante e dos *outliers*, alguns estratos (PISAuAd, OAzPaAd, ODPaAd e MAaPaAd) ficaram com um número de pontos menor que o originalmente proposto, o que pode afetar a qualidade do resultado, porém não

inviabiliza o emprego da estatística não-paramétrica.

A fim de comparar os erros médios de todos os estratos, foi inicialmente aplicado o teste de Kruskal-Wallis para verificar se todos os estratos possuíam, estatisticamente, as mesmas distribuições. O resultado rejeitou a hipótese nula de que todas as distribuições dos estratos são estatisticamente semelhantes. Diante disto, iniciou-se uma abordagem que permitisse analisar se cada uma das categorias formadoras dos estratos possuíam diferenças. Caso estas diferenças não ocorressem, alguns estratos poderiam ser agrupados, com a vantagem de se aumentar o número de observações para estes estratos.

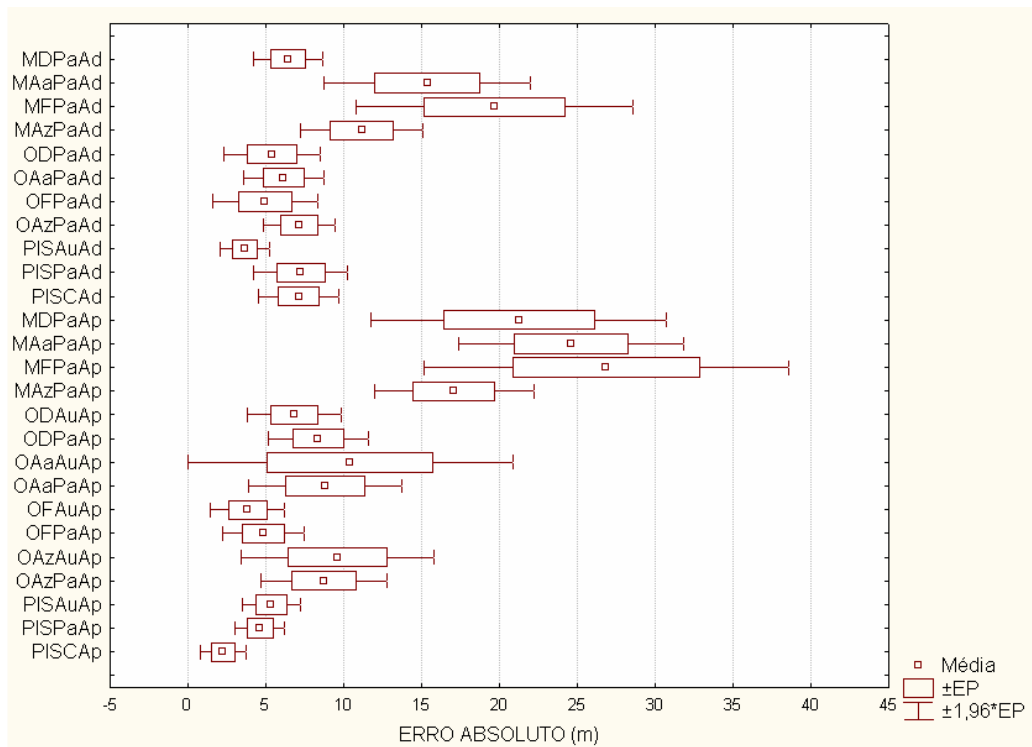


FIGURA 4.23 - *Box plots* dos erros absolutos dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.

TABELA 4.8 - Estatística descritiva dos erros absolutos por estrato.

Estrato	n	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
PISCAP	11	2,241	0,342	7,095	2,470
PISPaAp	13	4,638	0,703	10,064	2,935
PISAuAp	14	5,362	0,153	11,521	3,590
OAzPaAp	14	8,729	0,552	21,430	7,664
OAzAuAp	10	9,597	0,012	29,079	10,013
OFPaAp	10	4,849	0,124	12,990	4,227
OFAuAp	10	3,832	0,064	12,690	3,837
OAPaAp	13	8,811	0,032	27,232	9,117
OAAuAp	10	10,415	0,010	57,758	16,828
ODPaAp	13	8,359	1,024	22,757	5,923
ODAuAp	10	6,832	0,368	16,968	4,839
MAzPaAp	12	17,098	0,944	28,813	9,086
MFPaAp	12	26,863	2,922	66,096	20,735
MAAPaAp	11	24,596	7,934	42,274	12,192
MDPaAp	15	21,248	0,929	57,642	18,719
PISCAd	14	7,116	1,025	15,362	4,931
PISPaAd	11	7,239	0,448	17,852	5,114
PISAuAd	9	3,643	0,009	8,022	2,456
OAzPaAd	9	7,129	2,192	12,258	3,537
OFPaAd	10	4,943	0,972	19,320	5,419
OAPaAd	12	6,142	1,732	16,702	4,586
ODPaAd	8	5,401	0,663	13,460	4,468
MAzPaAd	12	11,175	1,584	27,798	6,967
MFPaAd	11	19,678	0,018	37,781	14,996
MAAPaAd	8	15,363	6,054	35,706	9,588
MDPaAd	13	6,418	0,766	13,925	4,044

A primeira categoria a ser analisada foi a das regiões da imagem na dimensão em alcance. Foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov comparando os pares de estratos correspondentes no alcance próximo e no alcance distante. Os valores-*p* calculados são apresentados na [Tabela 4.9](#). Os resultados indicam que em geral, todos os estratos não apresentam diferenças entre as regiões. Diante disto, foi considerado que,

em geral, não há diferenças significativas entre as classes no alcance próximo e distante, apesar da grande variação do ângulo de incidência do início ao término da faixa imageada. Este resultado também sugere que provavelmente não ocorreu um erro em alcance nesta coleta. O erro em alcance é principalmente provocado por atraso na medição de tempo de transmissão e recepção do sinal SAR, causando uma maior variação vertical no alcance próximo e uma maior variação horizontal no alcance distante (Maune, 2007). As variações do comprimento da distância inclinada da antena SAR ao alvo (causadas pelos possíveis atrasos) no alcance próximo tem um efeito maior na componente vertical da distância do que na componente horizontal. O oposto ocorre no alcance distante.

TABELA 4.9 - Valores- p do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos estratos nas regiões em alcance e nova nomenclatura adotada para os estratos agrupados.

Alcance próximo	Alcance distante	Valor- p	Estrato novo
PISCAp	PISCAAd	$p > 0,05$	PISC
PISPaAp	PISPaAd	$p > 0,05$	PISPa
PISAuAp	PISAuAd	$p > 0,05$	PISAu
OAzPaAp	OAzPaAd	$p > 0,05$	OAzPa
OFPaAp	OFPaAd	$p > 0,05$	OFPa
OAPaAp	OAPaAd	$p > 0,05$	OAPa
ODPaAp	ODPaAd	$p > 0,05$	ODPa
MAzPaAp	MAzPaAd	$p > 0,05$	MAzPa
MFPaAp	MFPaAd	$p > 0,05$	MFPa
MAAPaAp	MAAPaAd	$p > 0,05$	MAAPa
MDPaAp	MDPaAd	$p > 0,05$	MDPa

Os estratos em alcance próximo foram agrupados aos seus correspondentes no alcance distante, formando novos estratos, conforme a [Tabela 4.9](#). Esta união proporcionou o aumento do número de amostras para a maioria dos estratos (como pode ser observado na 2ª coluna da [Tabela 4.10](#)), com exceção dos estratos com gradiente de declividade ondulado em áreas urbanas que foram medidos apenas no alcance próximo, conforme [Tabela A.2](#) do Apêndice A.

A próxima categoria avaliada foi a de uso/cobertura do solo. Primeiramente foi realizado um teste desta categoria no gradiente de declividade plano, onde não há influência do relevo. Foi realizado o teste de Kruskal-Wallis para as classes cultura, pastagem e área urbana, obtendo-se um valor- p de 0,64, mostrando que provavelmente não há diferenças entre as classes de uso/cobertura do solo. Também foram

realizados testes de Kolmogorov-Smirnov em todos os possíveis pares de classes de uso/cobertura do solo no gradiente de declividade plano, não se encontrando nenhuma diferença significativa a um nível de significância de 5%, como pode ser observado na [Tabela 4.11](#).

Esperava-se inicialmente que pelo menos a classe área urbana possuísse um erro médio significativamente diferente das demais, de acordo com os resultados encontrados por Norheim *et al.* (2002) com dados de SAR aerotransportado na banda X. Em áreas urbanas ocorrem problemas causados por sombras e pela presença de refletores diédricos e triédricos, conforme Henderson e Lewis (1998).

TABELA 4.10 - Estatística descritiva dos erros por estrato sem a categoria de região na dimensão em alcance.

Estrato	n	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
PISC	25	0,870	-13,003	15,362	6,838
PlSPa	24	0,000	-17,852	14,958	7,286
PlSAu	23	1,746	-11,521	10,482	5,508
OAzPa	23	3,821	-17,761	21,430	9,658
OAzAu	10	7,311	-11,420	29,079	11,967
OFPa	20	0,185	-12,990	19,320	6,897
OFAu	10	3,113	-2,385	12,690	4,502
OAAuPa	25	-4,444	-27,232	9,034	9,568
OAAuAu	10	5,146	-8,339	57,758	19,346
ODPa	21	4,758	-8,689	22,757	7,832
ODAu	10	6,272	-2,434	16,968	5,619
MAzPa	24	-2,762	-27,798	28,813	16,505
MFPa	23	-21,577	-66,096	17,669	20,438
MAAuPa	19	-19,531	-42,274	11,184	13,794
MDPa	28	2,713	-57,642	49,974	21,260

TABELA 4.11 - Valores do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos estratos de cultura, pastagem, área urbana no gradiente de declividade plano.

Estratos	Valor- <i>p</i>
PISC x PlSPa	$p > 0,10$
PISC x PlSAu	$p > 0,10$
PlSPa x PlSAu	$p > 0,10$

No entanto, um exame do método empregado no levantamento em campo, oferece uma possível resposta ao ocorrido. Como o posicionamento relativo é sensível ao

multicaminho e necessita de uma quantidade mínima de satélites para a solução das ambigüidades, os receptores foram sempre posicionados em locais cujas condições propiciassem atingir estes requisitos. Para isto, foram freqüentemente levantados pontos em cruzamentos de ruas e locais afastados de edificações, como mostrado na Figura 4.24.



FIGURA 4.24 - Condições de levantamento em área urbana.

Para confirmar que a categoria uso/cobertura do solo não era influente no MDT, foram testadas área urbana versus pastagem no gradiente de declividade ondulado com os aspectos correspondentes. O teste de Kolmogorov-Smirnov não foi realizado em gradiente de declividade montanhoso, pois neste havia apenas a classe pastagem. Os resultados são apresentados na Tabela 4.12. Novamente não foram encontradas diferenças significativas, corroborando o resultado anterior.

TABELA 4.12 - Valores do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos estratos de pastagem e de área urbana no gradiente de declividade ondulado.

Estratos	Aspecto	Valor- <i>p</i>
OAzPa x OAzAu	Azimutal	$p > 0,05$
OFPa x OFAu	Frontal	$p > 0,05$
OAApa x OAAau	Anti-azimutal	$p > 0,05$
ODPa x ODAu	Dorsal	$p > 0,05$

Diante dos resultados obtidos, não havia razões para permanecer com a categoria de uso/cobertura do solo separadas. Os estratos foram então reagrupados de acordo com a Tabela 4.13 sendo adotado uma nova nomenclatura para os novos estratos. A Tabela 4.14 apresenta a estatística descritiva dos novos estratos.

TABELA 4.13 - Nova nomenclatura dos estratos sem a categoria de uso/cobertura do solo.

Estrato antigo	Estrato novo	Característica
PISC, PISPa, PISAu	PI	Plano
OAzPa, OAzAu	OAz	Ondulado/Azimutal
OFPa, OFAu	OF	Ondulado/Frontal
OAApa, OAAAu	OAA	Ondulado/Anti-azimutal
ODPa, ODAu	OD	Ondulado/Dorsal
MAzPa	MAz	Montanhoso/Azimutal
MFPa	MF	Montanhoso/Frontal
MAaPa	MAa	Montanhoso/Anti-azimutal
MDPa	MD	Montanhoso/Dorsal

TABELA 4.14 - Estatística descritiva dos erros por estrato sem a categoria de uso/cobertura do solo.

Estrato	n	Média (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	DP (m)
PI	72	0,860	-17,852	15,362	6,551
OAz	33	4,878	-17,761	29,079	10,347
OF	30	1,161	-12,990	19,320	6,280
OAA	35	-1,704	-27,232	57,758	13,528
OD	31	5,246	-8,689	22,757	7,134
MAz	24	-2,762	-27,798	28,813	16,505
MF	23	-21,577	-66,096	17,669	20,438
MAa	19	-19,531	-42,274	11,184	13,794
MD	28	2,713	-57,642	49,974	21,260

A hipótese nula de que os novos estratos são estatisticamente iguais foi rejeitada ao se aplicar o teste de Kruskal-Wallis. Portanto, há diferenças estatisticamente significantes entre alguns estratos, conforme o sucedido com Ludwig e Schneider (2006) com dados da banda X. Para verificar quais destes estratos apresentavam diferenças, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov entre os pares de estratos, sendo possível observar os resultados na [Tabela 4.15](#).

TABELA 4.15 - Valores-*p* do teste Kolmogorov-Smirnov para os estratos sem uso/cobertura do solo.

	OAz	OD	OAA	OF	MAz	MD	MAa	MF
PI	< 0,10	< 0,03	< 0,10	> 0,10	< 0,03	< 0,05	< 0,00	< 0,00
OAz		> 0,10	< 0,05	> 0,10	< 0,10	> 0,10	< 0,00	< 0,00
OD			< 0,01	< 0,03	< 0,03	> 0,10	< 0,00	< 0,00
OAA				< 0,10	> 0,10	< 0,05	< 0,00	< 0,00
OF					< 0,05	< 0,10	< 0,00	< 0,00
MAz						> 0,10	< 0,01	< 0,05
MD							< 0,00	< 0,00
MAa								> 0,10

Os *box plots* dos erros e erros absolutos dos estratos são apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26, respectivamente.

Os estratos MF e MAa apresentam os maiores valores de erros médios, apresentando as respectivas componentes de tendência dos estratos. Os outros estratos possuem os erros mais próximos do valor nulo (Figura 4.25). A Figura 4.26 permite identificar os estratos montanhosos como os que possuem erros com maior variabilidade que os demais estratos. Os erros do estrato PI apresentam visualmente uma menor dispersão.

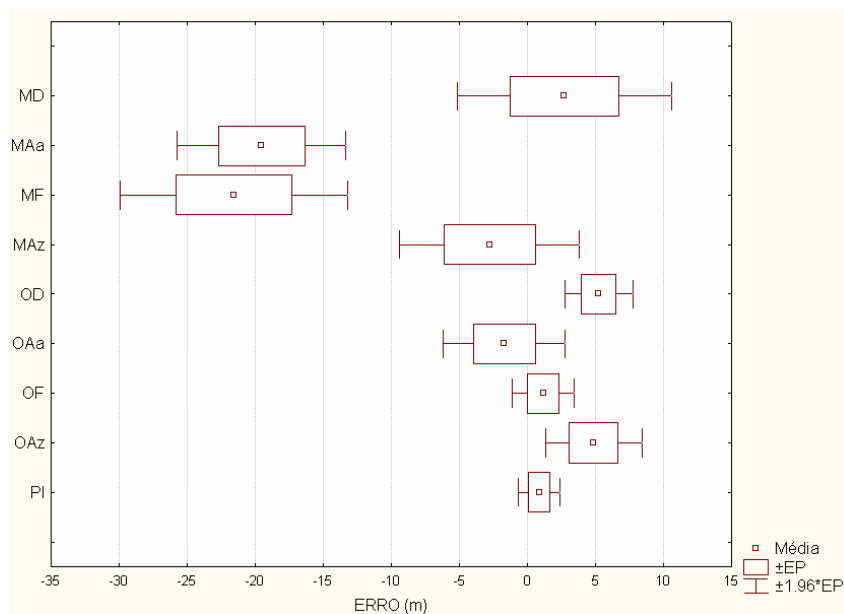


FIGURA 4.25 - *Box plots* dos erros dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.

Foi então aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov com o intuito de verificar se a categoria aspecto era influente nos erros. Foram testados os erros entre as diferentes classes de aspecto para cada uma das classes de gradiente de declividade. Os resultados são apresentados na Tabela 4.16, sendo possível notar que a maioria obteve resultados significativos, ou seja, não podem ser considerados estatisticamente semelhantes. Portanto o aspecto é um fator influente na qualidade do MDT do SAR R-99B. Com o propósito de se utilizar testes paramétricos foi realizado o teste de

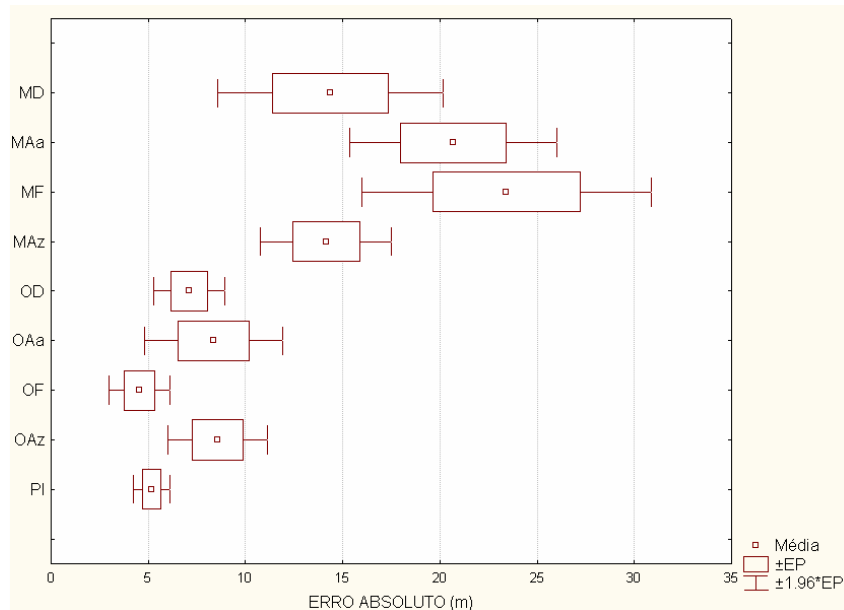


FIGURA 4.26 - *Box plots* dos erros absolutos dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.

Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos erros de cada estrato. A maioria dos erros dos estratos apresentaram normalidade para $\alpha = 5\%$, com exceção dos estratos OAa e MD (p -valores de 0,000 e 0,002, respectivamente).

Foi utilizado o teste t para uma amostra a fim de verificar quais dos estratos possuíam erro médio estatisticamente igual a zero. Os erros dos estratos PI, OF, OAa, MAZ e MD não rejeitaram a hipótese nula, ou seja, não apresentam a componente de tendência específica do estrato a um nível de significância de 5%, conforme mostrado na [Tabela 4.17](#).

A partir destes resultados, foram realizados os testes de Kolmogorov-Smirnov para identificar quais estratos poderiam ser agrupados. O primeiro grupo avaliado foi o composto pelos estratos MAa e MF, por não apresentarem erro médio estatisticamente igual a zero e tenderem a subestimar as altitudes, como pode ser observado na localização dos respectivos *box plots* ([Figura 4.25](#)). O teste apresentou um resultado não significativo (valor- $p > 0,10$), aceitando-se a hipótese nula de que os erros médios destes estratos são estatisticamente iguais.

TABELA 4.16 - Valores- p do teste Kolmogorov-Smirnov para comparação dos erros das classes de aspecto nos gradientes de declividade ondulado e montanhoso

Gradiente de declividade ondulado		
Estrato	Estrato	Valor- p
OAz	OF	>,10
OAz	OAA	<,05
OAz	OD	>,10
OF	OAA	<,10
OF	OD	<,025
OAA	OD	<,005
Gradiente de declividade montanhoso		
Estrato	Estrato	Valor- p
MAz	MF	<,05
MAz	MAA	<,01
MAz	MD	>,10
MF	MAA	>,10
MF	MD	<,001
MAA	MD	<,001

TABELA 4.17 - Estatística descritiva dos estratos sem uso/ocupação do solo e valores- p do teste t para uma amostra usado na identificação dos estratos com erro médio igual a zero.

Estrato	n	Média	Mínimo	Máximo	DP	Valor- p
PI	72	0,860	-17,852	15,362	6,551	0,269
OAz	33	4,878	-17,761	29,079	10,347	0,01
OF	30	1,161	-12,990	19,320	6,280	0,320
OAA	35	-1,704	-27,232	57,758	13,528	0,461
OD	31	5,246	-8,689	22,757	7,134	0,000
MAz	24	-2,762	-27,798	28,813	16,505	0,421
MF	23	-21,577	-66,096	17,669	20,438	0,000
MAA	19	-19,531	-42,274	11,184	13,794	0,000
MD	28	2,713	-57,642	49,974	21,260	0,505

Os estratos OD e OAz foram testados em conjunto, por possuírem uma tendência a superestimar as altitudes e possuírem erros médios diferentes de zero, conforme ilustrado na (Figura 4.25). O resultado (valor- $p > 0,10$) apontou que não há diferença estatisticamente significativa entre os erros médios dos dois estratos.

Os estratos com erros médios iguais a zero também foram avaliados entre si, primeiramente com o teste de Kruskal-Wallis, que teve a hipótese nula rejeitada, ou seja, nem todos os estratos são estatisticamente iguais. A seguir foi empregado o teste Kolmogorov-Smirnov para avaliar os erros destes estratos.

Conforme os resultados apresentados na [Tabela 4.15](#), os estratos OAa, OF e PI puderam ser agrupados em um novo estrato por serem estatisticamente semelhantes entre si, assim como os estratos OD e OAz compuseram um outro estrato. Os estratos agrupados são apresentados na [Tabela 4.18](#). As estatísticas dos erros e erros absolutos são apresentadas nas Tabelas [4.19](#) e [4.20](#), respectivamente.

A [Figura 4.27](#) mostra que o estrato MAaMF apresentou um valor de erro médio maior que os demais estratos, com uma tendência a subestimar as altitudes. Os estratos PIOAaOF e MDMAz não apresentaram tendência. Já o estrato ODOAz apresentou uma tendência positiva, significando que superestima as altitudes.

TABELA 4.18 - Composição dos estratos obtidos com agrupamento.

Estratos	Estrato novo
MAa, MF	MAaMF
MD, MAz	MDMAz
OD, OAz	ODOAz
PI, OAa, OF	PIOAaOF

TABELA 4.19 - Estatística descritiva dos erros dos estratos agrupados.

Estrato	n	Média	Mínimo	Máximo	DP
PIOFOAa	137	0,271	-27,232	57,758	8,828
ODOAz	64	5,057	-17,761	29,079	8,868
MDMAz	52	0,186	-57,642	49,974	19,229
MAaMF	42	-20,651	-66,096	17,669	17,571

TABELA 4.20 - Estatística descritiva dos erros absolutos dos estratos agrupados.

Estrato	n	Média	Mínimo	Máximo	DP
PIOFOAa	137	5,844	0,009	57,758	6,602
ODOAz	64	7,852	0,012	29,079	6,480
MDMAz	52	14,259	0,766	57,642	12,747
MAaMF	42	22,197	0,018	66,096	15,520

Observando-se a [Figura 4.28](#), que ilustra os *box plots* dos erros absolutos dos estratos, é possível perceber que o estrato MDMAz apresentou a maior dispersão dos erros, seguido dos estratos MAaMF, ODOAz e PIOAaOF, respectivamente.

Os histogramas dos erros dos estratos permitiu identificar a forma da distribuição

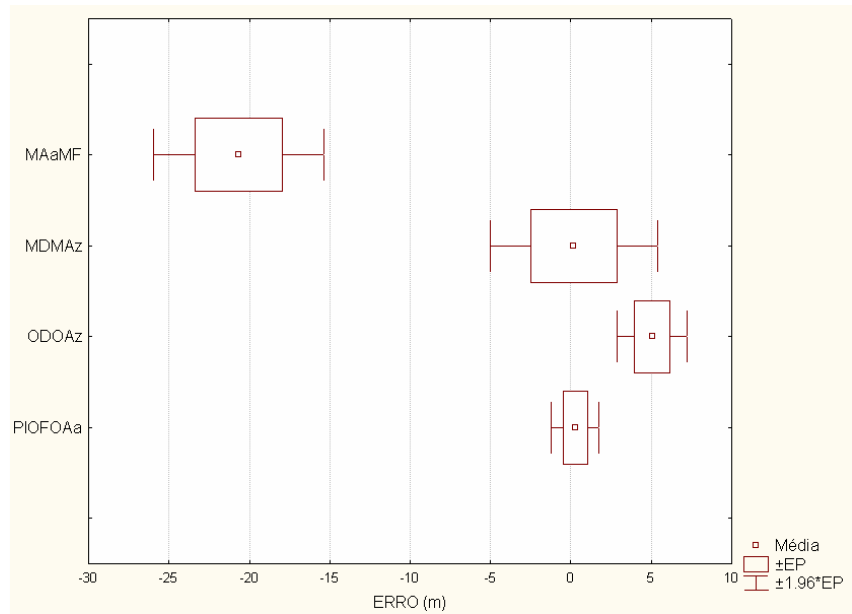


FIGURA 4.27 - *Box plots* dos erros dos estratos agrupados.

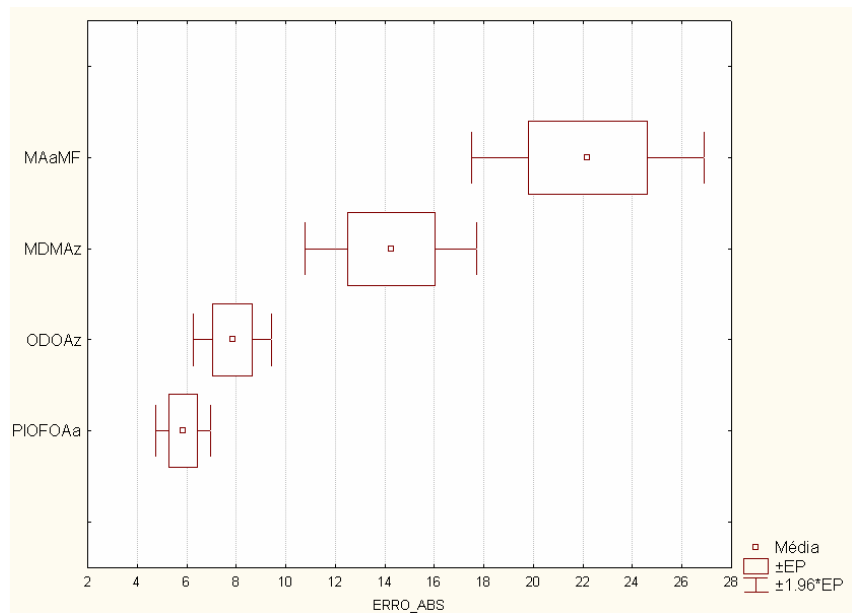


FIGURA 4.28 - *Box plots* dos erros absolutos dos estratos agrupados.

de frequência dos erros. Os histogramas dos estratos MAaMF e MDMAz são mais achatados que os demais estratos, indicando uma maior dispersão dos erros.

A análise da Tabela 4.19 permite constatar que os estratos PIOFOAa e MDMAz não apresentam tendência. O estrato MAaMF apresenta um valor de erro médio negativo, apresentando uma tendência a subestimar as altitudes, conforme observado pela maior frequência de erros negativos no histograma deste estrato (Figura 4.29). Contrariamente, o estrato ODOAz apresenta uma pequena tendência a superestimar as altitudes.

A Tabela 4.20 permite observar que os estratos MAaMF e MDMAz tem alta variabilidade em comparação com os estratos PiodFOAa e ODOAz que possuem uma variabilidade menor. É possível verificar na Tabela 4.19 e no histograma da Figura 4.29 que o estrato MDMAz tem o maior valor de amplitude.

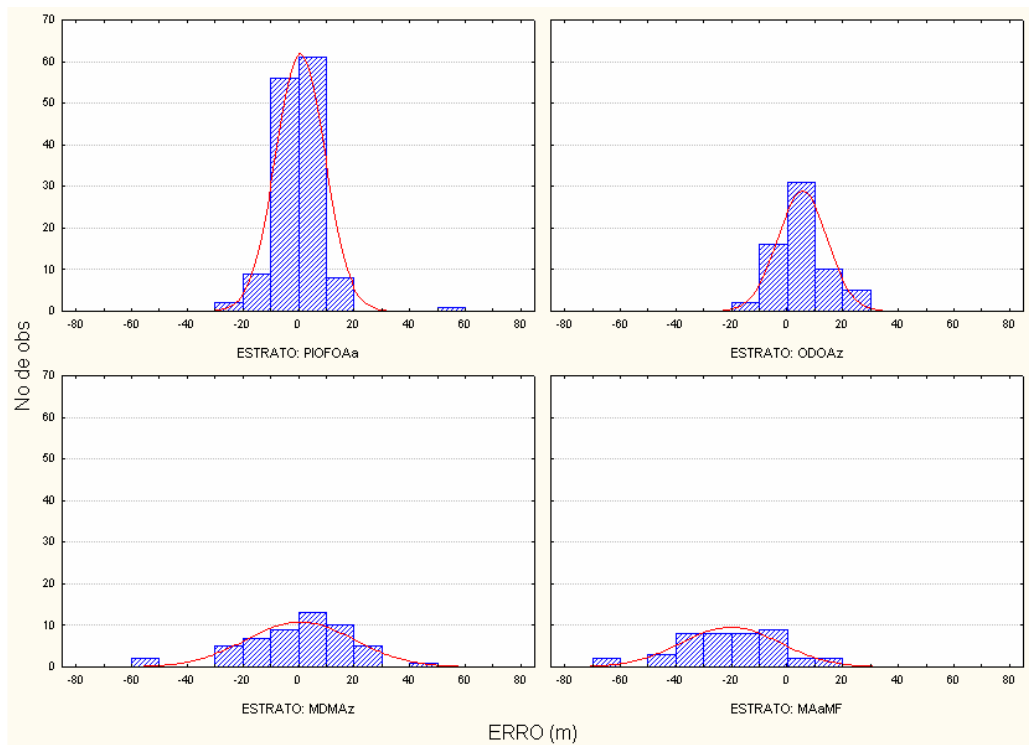


FIGURA 4.29 - Histograma dos erros dos estratos agrupados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar altimetricamente os erros do modelo digital do terreno extraído dos dados SAR interferométricos na banda X do SAR R-99B. Mais especificamente, buscou-se identificar os possíveis fatores que afetariam a qualidade do MDT: região da imagem na dimensão em alcance, uso/ocupação do solo, gradiente de declividade e aspecto. Também foi realizada uma avaliação cartográfica tradicional do MDT, de acordo com o PEC e o NSSDA, para validá-lo.

Para a consecução deste propósito, foi utilizado um MDT (apresentado na [Figura 3.4](#)) obtido de um aerolevantamento realizado pela aeronave prefixo FAB 6750 em 12 de julho de 2006, cobrindo parte da área do Município de São José dos Campos.

Antecedendo o levantamento de campo, a área de estudo foi estratificada, considerando os fatores que poderiam afetar o MDT. O mapa de estratos ([Figura 4.4](#)) foi obtido a partir do cruzamento das classes de região na dimensão em alcance, de uso/ocupação do solo (extraída da classificação de uma imagem obtida com o sensor TM/Landsat-5), de gradiente de declividade e aspecto (extraídas do MDT do IGC).

Utilizando-se o mapa de estratos, foi realizada uma amostragem aleatória estratificada uniforme com os estratos passíveis de serem levantados por GPS. Foram selecionados os estratos formados pelas classes cultura, pastagem e área urbana.

Como referência, foram coletadas amostras em 26 estratos de interesse, tendo sido levantados 391 pontos com o posicionamento relativo (método estático) com precisão centimétrica (distribuídos de acordo com a [Figura 3.9](#)) e as principais vias terrestres da área de estudo ([Figura 3.10](#)) com o posicionamento diferencial (DGPS) com precisão submétrica. Após a remoção dos pontos com baixa qualidade e dos *outliers* restaram 295 pontos que puderam ser utilizados neste trabalho.

A análise visual permitiu identificar a presença de “ilhas” cercadas por sombras e possuindo valores de altitudes anômalos em relação à vizinhança, causada pelo isolamento da área durante o desdobramento da fase no processo interferométrico. Este tipo de erro poderia ter sido corrigido por uma intervenção manual do operador durante o processamento interferométrico, desde que conhecido o valor da altitude

de algum ponto no interior destas “ilhas”. Não foram identificados problemas de construção do mosaico, deslocamentos transversais ao longo dos perfis longitudinais em feições lineares, ou outras anomalias perceptíveis na escala de visualização empregada.

Constatou-se que o MDT estava deslocado planimetricamente ao ser comparado com o arquivo vetorial de vias terrestres, sendo realizada uma translação de 178,297 m com azimute de $146,923^\circ$ e uma rotação de $0,2^\circ$. O MDT corrigido apresentou visualmente um melhor ajuste com os dados de referência do que o MDT original (conforme observado na Figura 4.5), sendo corroborado pelos resultados obtidos com a análise de regressão (Tabela 4.5). A presença do deslocamento planimétrico inviabiliza o uso do MDT original se não for realizada previamente, uma correção geométrica que minimize o problema de posicionamento. Todas as análises posteriores foram realizadas com o MDT corrigido.

Os erros encontrados (definidos como a diferença entre a altitude no MDT e a altitude GPS) não apresentaram uma distribuição normal a um nível de significância de 5%. Os erros provenientes do MDT apresentaram um RMSE de 33,078 m. A análise de tendência apontou, para um nível de significância de 5%, que o MDT possui tendência negativa, isto é, o MDT subestima as altitudes. Uma das causas da presença de tendência nos erros é o fato do MDT ser relativo. Pela análise de precisão, o MDT corrigido atende a escala de 1:100.000 classe A do PEC, depois de removida a tendência.

Para a análise por estrato foi removida a tendência global, considerando-a como o valor do erro médio (27,83 m) do estrato plano/pastagem, pois neste estrato a vegetação é normalmente rasteira, pouco diferindo da altura do terreno e não há a influência do relevo.

A análise individual das categorias permitiu determinar que há influência entre as categorias, justificando a análise por estratos. Esta influência é exemplificada pela grande dispersão dos erros da classe pastagem em relação às demais. Isto se deve a presença de amostras desta classe em relevo montanhoso, o que não ocorre com as classes cultura e área urbana.

A análise por estratos foi realizada com a estatística não-paramétrica, principalmente pela quantidade reduzida de pontos amostrados dos estratos.

A partir das análises dos estratos verificou-se que em geral, os fatores relacionados à região da imagem na dimensão em alcance e uso/cobertura do solo não são influentes nos erros do MDT. Não houve diferenças significativas entre os estratos situados no alcance próximo com os localizados no alcance distante e tampouco para os estratos de uso/cobertura do solo para um nível de significância de 5%.

Uma possível explicação para não haver diferença significativa entre as classes de alcance próximo e de alcance distante é o fato da largura da faixa imageada (aproximadamente 10 km) ser relativamente estreita se comparada, por exemplo, com a faixa de um sensor orbital como o RADARSAT-1, que gera imagens com valores de largura acima de 50 km.

As classes de uso/ocupação do solo não apresentaram diferenças significativas apesar da aparente diversidade de tipos de alvos (como ilustrado no Apêndice B). Uma observação mais detalhada permite notar que a maioria dos tipos de uso/cobertura medidos estavam próximos ao solo e em áreas com poucas obstruções para permitir o levantamento GPS (como no caso de área urbana). A única exceção era a cultura de milho; durante o levantamento de campo esta cultura estava completamente desenvolvida, sendo o tipo de vegetação mais alto na área levantada. Posteriormente foi verificado que durante o período do aerolevanteamento, o milho ainda não havia sido semeado, o que explicaria o fato deste tipo de vegetação não ter influenciado nos resultados.

Os estratos com gradiente de declividade montanhoso com aspectos dorsal e azimutal (MDMAz) e montanhoso com aspecto anti-azimutal e frontal (MAaMF) apresentaram alta variabilidade dos erros (desvios-padrão de 19,229 e 17,571 m, respectivamente), como era esperado para gradientes de declividade mais acentuados. O estrato plano e ondulado com aspectos frontal e anti-azimutal (PIOFOAa) e ondulado com aspecto dorsal e azimutal (ODOAz) apresentaram variabilidade média (8,828 e 8,868 m, respectivamente), porém o estrato PIOFOAa apresentou média nula, enquanto o estrato ODOAz tem uma tendência a superestimar as altitudes (erro médio de 5,057 m). O estrato MDMAz apresentou média nula, porém teve alta variabilidade e amplitude (desvio-padrão e amplitude de 19,229 e 107,616 m, respectivamente), o que mostra que este estrato apresenta mais erros que os demais. Isto era esperado pelo fato deste estrato ser formado pelas classes de gradiente de declividade montanhoso e aspecto dorsal, apresentando mais regiões com sombras e de baixa coerência.

Uma possível explicação sobre a semelhança das classes dorsal com azimutal e frontal com anti-azimutal tanto no ondulado, quanto no montanhoso pode estar relacionada a uma deriva (ângulo compreendido entre o eixo longitudinal da aeronave e a direção de vôo) da aeronave não corrigida pelo sistema de estabilização do sensor durante o aerolevanteamento. Seriam necessários os dados de atitude da aeronave durante o aerolevanteamento para verificar esta hipótese.

Apesar do SAR R-99B apresentar uma alta resolução espacial no modo interferométrico (3 m), o modelo digital do terreno extraído não atendeu às escalas altimétricas maiores que 1:100.000 (classe A), resultado aquém do esperado, e apresentou um erro planimétrico de 178,297 m, o que inviabiliza a sua utilização em cartografia, caso não seja realizada previamente uma correção geométrica apropriada e a remoção da tendência.

A principal sugestão para trabalhos futuros, é a busca da causa e a solução do problema do erro planimétrico do MDT. Este tipo de erro inviabiliza o uso direto do modelo e compromete a informação altimétrica.

Um maior adensamento de pontos nos estratos existentes seria importante para verificar os resultados com o emprego da estatística paramétrica.

Trabalhos futuros poderiam incluir o desenvolvimento de processadores que gerassem a imagem SAR com mesma dimensão e georeferenciamento do MDT. A imagem poderia então ser ortorretificada com o MDT para se conhecer a acurácia planimétrica da ortoimagem.

Seria importante o estudo na classe floresta, com o uso de equipamento topográfico adequado, pois o sensor SAR R-99B é empregado prioritariamente sobre este tipo de cobertura do solo. Também seria relevante a pesquisa da acurácia vertical do MDT, às margens dos corpos d'água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. W. L. Sistema de Vigilância da Amazônia - SIVAM: perspectivas da economia de defesa. **A Defesa Nacional**, v. 88, n. 793, p. 42-57, 2002.

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

ASHTech CORPORATION LIMITED (Ashtech), **Z-Surveyor and Z-FX operation and reference manual**. Sunnyvale, CA, 1998. 82p. Manual.

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.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (ed). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 344p. Disponível na biblioteca digital URLib: <sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43>. Acesso em: 22 jan. 2006.

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

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**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/indexf7a0.html?q=node/41>> Acesso em: 14 ago. 2007.

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

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística:** para engenharia e ciências. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006. 692p.

DUTRA, L. V.; ELMIRO M. T.; FREITAS, C. C.; SANTOS, J. R.; MURA, J. C.; FILHO, S. S. The use of multi-frequency interferometric products to improve SAR imagery interpretability and classification by image fusion. In: Workshop em Tratamento de Imagens, 3., 2002, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.npdi.dcc.ufmg.br/workshop/wti2002/wti2002.html>> Acesso em: 10 jan. 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA S.A. (Embraer), **ISR** - information dominance in the air, on the ground and at sea. São José dos Campos, 2007. Catálogo.

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.

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> Acesso em: 15 jan. 2006.

GENS, R. **Quality assessment of SAR interferometric data.** 1998. 141 p. Dissertação (PhD em Engenharia) - Universidade de Hannover, Hannover. 1998. (ISBN 90 6164 155 1).

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.

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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades@**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>> Acesso em: 01 fev. 2006.

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.

LIN, Q.; VESECKY, J. F. Comparison of elevation derived from INSAR data with DEM over large relief terrain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 1775-1790, 1994.

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. Bethesda, MA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007. 655p.

MERCER, J. B.; THORNTON, S.; TENNANT, K. Operational DEM production from airborne interferometry and from RADARSAT stereo technologies. In: ASPRS-RTI Annual Conference, 1998, Tampa. **Proceedings...** Bethesda: ASPRS, 1998. p. 1-11.

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

MORELLI, A. F.; CAVALHEIRO, F.; ALVES, M. A.; FANTIN, M. Representação espacial da cobertura vegetal natural original do município de São José dos Campos (SP). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 681-689.

MOURA, P. **Calibração dos modelos digitais de elevação gerados por interferometria SAR nas bandas P e X**. 2005. 216 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

MURA, J.C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR**. 2000. 160 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000.

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

NETER, J.; KUTNER, M. H.; WASSERMAN, W.; NACHTSHEIM, C. J. **Applied linear statistical models**. 2. ed. New York, NY: McGraw-Hill Publishing Company, 1996. 1408p.

NORHEIM, R. A.; QUEIJA, V. R.; HAUGERUD, R. A. Comparison of LIDAR and INSAR DEMs with dense ground control. In: Environmental Systems Research Institute 2002 User Conference, July, San Diego, CA. **Proceedings...** Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap0442/p0442.htm>>. Acesso em: 26 jul. 2006.

OLIVEIRA, C. G. **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais ópticos (Aster) e radar (Radarsat-1, SRTM): um estudo para a região da Serra dos Carajás.** 2005. 184 p. (INPE-13168-TDI/1027). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N., ROSSI, M.; FILHO, B. C. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo:** Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA-Solos. 1999. Escala 1:500.000.

OLLIER, C. D. Geomorphic indications of contour map inaccuracy. **Cartography**, v. 6, n. 3, p 121-124, 1967.

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.

PIKE, R. J. **A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography-supplement 4.0.** Menlo Park, CA: USGS, 2002. 158 p. (02-465). Disponível em: <<http://wrgis.wr.usgs.gov/open-file/of02-465/>>. Acesso em: 03 jan. 06.

ROBISON, A. H.; MORRISON, J. L. ; MUEHRCKE, P. C. ; KIMERLING, A. J.; GUPTILL, S. C. **Elements of cartography.** 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1995. cap. 13, p. 222-245.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo** - escala 1:500.000. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1997. 64p. v1.

SANT'ANNA, J. S.; FREITAS, C. C. Um estudo monte carlo na avaliação de erro em modelos digitais de elevação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3579-3586. CD-ROM.

SANTOS, D. R.; TOMMASELLI, A. M. G. Extração semi-automática de edificações com análise do MNE. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 8, n. 1, p. 25-45, 2002.

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

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1977. 350 p.

SMALL, D.; NÜESCH, D. Validation of height models from ERS interferometry. In: ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry, 1996, Zürich, Switzerland. **Proceedings...** Zürich. 1996. Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/>>. Acesso em: 26 jul. 2006.

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.

SOKKIA CO. Ltd. (Sokkia), **Stratus operation manual**. Olathe, KS, 2002. 125p. Manual.

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 CORPORATION (Topcon), **Hiper Series**. Essebaan, 2004. Catálogo.

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED (Trimble), **Wave baseline processing - user guide**. Sunnyvale, CA, 2001. 224p. Manual.

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

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: 29 jun. 2007.

VALERIANO, M. M. **Estimativa de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos**. 1999. 172p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, Rio Claro, 1999.

VEIGA, R. Q.; SANT'ANNA, S. J. S. **Imageamento radar**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, 2002. cap. 3, p. 28. Notas de Curso.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain analysis: principles and applications**. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000. cap. 1, p. 1-6.

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.
Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/>>.
Acesso em: 26 jul. 2006.

ZEBKER, H. A.; WERNER, C. L.; ROSEN, P. A.; HENSLEY, S. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 823-836, July 1994.

APÊNDICE A

LISTAGEM DE ESTRATOS

TABELA A.1 - Descrição dos estratos com nomenclatura original.

Estrato	Gradiente	Aspecto	Uso/Cobertura do solo	Região
1	Plano	Sem Aspecto	Cultura	Alcance Próximo
2	Plano	Sem Aspecto	Água	Alcance Próximo
3	Plano	Sem Aspecto	Pastagem	Alcance Próximo
4	Plano	Sem Aspecto	Floresta	Alcance Próximo
5	Plano	Sem Aspecto	Área Urbana	Alcance Próximo
6	Plano	Sem Aspecto	Solo Exposto	Alcance Próximo
7	Ondulado	Azimutal	Cultura	Alcance Próximo
8	Ondulado	Azimutal	Água	Alcance Próximo
9	Ondulado	Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
10	Ondulado	Azimutal	Floresta	Alcance Próximo
11	Ondulado	Azimutal	Área Urbana	Alcance Próximo
12	Ondulado	Azimutal	Solo Exposto	Alcance Próximo
13	Ondulado	Frontal	Cultura	Alcance Próximo
14	Ondulado	Frontal	Água	Alcance Próximo
15	Ondulado	Frontal	Pastagem	Alcance Próximo
16	Ondulado	Frontal	Floresta	Alcance Próximo
17	Ondulado	Frontal	Área Urbana	Alcance Próximo
18	Ondulado	Frontal	Solo Exposto	Alcance Próximo
19	Ondulado	Anti-Azimutal	Cultura	Alcance Próximo
20	Ondulado	Anti-Azimutal	Água	Alcance Próximo
21	Ondulado	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
22	Ondulado	Anti-Azimutal	Floresta	Alcance Próximo
23	Ondulado	Anti-Azimutal	Área Urbana	Alcance Próximo
24	Ondulado	Anti-Azimutal	Solo Exposto	Alcance Próximo
25	Ondulado	Dorsal	Cultura	Alcance Próximo
26	Ondulado	Dorsal	Água	Alcance Próximo
27	Ondulado	Dorsal	Pastagem	Alcance Próximo

(continua)

TABELA A.1 - Continuação.

Estrato	Gradiente	Aspecto	Uso/Cobertura do solo	Região
28	Ondulado	Dorsal	Floresta	Alcance Próximo
29	Ondulado	Dorsal	Área Urbana	Alcance Próximo
30	Ondulado	Dorsal	Solo Exposto	Alcance Próximo
31	Montanhoso	Azimutal	Cultura	Alcance Próximo
32	Montanhoso	Azimutal	Água	Alcance Próximo
33	Montanhoso	Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
34	Montanhoso	Azimutal	Floresta	Alcance Próximo
35	Montanhoso	Azimutal	Área Urbana	Alcance Próximo
36	Montanhoso	Azimutal	Solo Exposto	Alcance Próximo
37	Montanhoso	Frontal	Cultura	Alcance Próximo
38	Montanhoso	Frontal	Água	Alcance Próximo
39	Montanhoso	Frontal	Pastagem	Alcance Próximo
40	Montanhoso	Frontal	Floresta	Alcance Próximo
41	Montanhoso	Frontal	Área Urbana	Alcance Próximo
42	Montanhoso	Frontal	Solo Exposto	Alcance Próximo
43	Montanhoso	Anti-Azimutal	Cultura	Alcance Próximo
44	Montanhoso	Anti-Azimutal	Água	Alcance Próximo
45	Montanhoso	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
46	Montanhoso	Anti-Azimutal	Floresta	Alcance Próximo
47	Montanhoso	Anti-Azimutal	Área Urbana	Alcance Próximo
48	Montanhoso	Anti-Azimutal	Solo Exposto	Alcance Próximo
49	Montanhoso	Dorsal	Cultura	Alcance Próximo
50	Montanhoso	Dorsal	Água	Alcance Próximo
51	Montanhoso	Dorsal	Pastagem	Alcance Próximo
52	Montanhoso	Dorsal	Floresta	Alcance Próximo
53	Montanhoso	Dorsal	Área Urbana	Alcance Próximo
54	Montanhoso	Dorsal	Solo Exposto	Alcance Próximo
55	Plano	Sem Aspecto	Cultura	Alcance Distante
56	Plano	Sem Aspecto	Água	Alcance Distante
57	Plano	Sem Aspecto	Pastagem	Alcance Distante
58	Plano	Sem Aspecto	Floresta	Alcance Distante
59	Plano	Sem Aspecto	Área Urbana	Alcance Distante

(continua)

TABELA A.1 - Continuação.

Estrato	Gradiente	Aspecto	Uso/Cobertura do solo	Região
60	Plano	Sem Aspecto	Solo Exposto	Alcance Distante
61	Ondulado	Azimutal	Cultura	Alcance Distante
62	Ondulado	Azimutal	Água	Alcance Distante
63	Ondulado	Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
64	Ondulado	Azimutal	Floresta	Alcance Distante
65	Ondulado	Azimutal	Área Urbana	Alcance Distante
66	Ondulado	Azimutal	Solo Exposto	Alcance Distante
67	Ondulado	Frontal	Cultura	Alcance Distante
68	Ondulado	Frontal	Água	Alcance Distante
69	Ondulado	Frontal	Pastagem	Alcance Distante
70	Ondulado	Frontal	Floresta	Alcance Distante
71	Ondulado	Frontal	Área Urbana	Alcance Distante
72	Ondulado	Frontal	Solo Exposto	Alcance Distante
73	Ondulado	Anti-Azimutal	Cultura	Alcance Distante
74	Ondulado	Anti-Azimutal	Água	Alcance Distante
75	Ondulado	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
76	Ondulado	Anti-Azimutal	Floresta	Alcance Distante
77	Ondulado	Anti-Azimutal	Área Urbana	Alcance Distante
78	Ondulado	Anti-Azimutal	Solo Exposto	Alcance Distante
79	Ondulado	Dorsal	Cultura	Alcance Distante
80	Ondulado	Dorsal	Água	Alcance Distante
81	Ondulado	Dorsal	Pastagem	Alcance Distante
82	Ondulado	Dorsal	Floresta	Alcance Distante
83	Ondulado	Dorsal	Área Urbana	Alcance Distante
84	Ondulado	Dorsal	Solo Exposto	Alcance Distante
85	Montanhoso	Azimutal	Cultura	Alcance Distante
86	Montanhoso	Azimutal	Água	Alcance Distante
87	Montanhoso	Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
88	Montanhoso	Azimutal	Floresta	Alcance Distante
89	Montanhoso	Azimutal	Área Urbana	Alcance Distante
90	Montanhoso	Azimutal	Solo Exposto	Alcance Distante
91	Montanhoso	Frontal	Cultura	Alcance Distante

(continua)

TABELA A.1 - Continuação.

Estrato	Gradiente	Aspecto	Uso/Cobertura do solo	Região
92	Montanhoso	Frontal	Água	Alcance Distante
93	Montanhoso	Frontal	Pastagem	Alcance Distante
94	Montanhoso	Frontal	Floresta	Alcance Distante
95	Montanhoso	Frontal	Área Urbana	Alcance Distante
96	Montanhoso	Frontal	Solo Exposto	Alcance Distante
97	Montanhoso	Anti-Azimutal	Cultura	Alcance Distante
98	Montanhoso	Anti-Azimutal	Água	Alcance Distante
99	Montanhoso	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
100	Montanhoso	Anti-Azimutal	Floresta	Alcance Distante
101	Montanhoso	Anti-Azimutal	Área Urbana	Alcance Distante
102	Montanhoso	Anti-Azimutal	Solo Exposto	Alcance Distante
103	Montanhoso	Dorsal	Cultura	Alcance Distante
104	Montanhoso	Dorsal	Água	Alcance Distante
105	Montanhoso	Dorsal	Pastagem	Alcance Distante
106	Montanhoso	Dorsal	Floresta	Alcance Distante
107	Montanhoso	Dorsal	Área Urbana	Alcance Distante
108	Montanhoso	Dorsal	Solo Exposto	Alcance Distante

TABELA A.2 - Descrição dos estratos levantados com nomenclatura modificada.

Estrato	Gradiente	Aspecto	Uso/Cobertura do solo	Região
PISCAP	Plano	Sem Aspecto	Cultura	Alcance Próximo
PISPaAp	Plano	Sem Aspecto	Pastagem	Alcance Próximo
PISAuAp	Plano	Sem Aspecto	Área Urbana	Alcance Próximo
OAzPaAp	Ondulado	Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
OAzAuAp	Ondulado	Azimutal	Área Urbana	Alcance Próximo
OFPaAp	Ondulado	Frontal	Pastagem	Alcance Próximo
OFAuAp	Ondulado	Frontal	Área Urbana	Alcance Próximo
OAApaAp	Ondulado	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
OAAuAp	Ondulado	Anti-Azimutal	Área Urbana	Alcance Próximo
ODPaAp	Ondulado	Dorsal	Pastagem	Alcance Próximo
ODAuAp	Ondulado	Dorsal	Área Urbana	Alcance Próximo
MAzPaAp	Montanhoso	Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
MFPaAp	Montanhoso	Frontal	Pastagem	Alcance Próximo
MAaPaAp	Montanhoso	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Próximo
MDPaAp	Montanhoso	Dorsal	Pastagem	Alcance Próximo
PISCAd	Plano	Sem Aspecto	Cultura	Alcance Distante
PISPaAd	Plano	Sem Aspecto	Pastagem	Alcance Distante
PISAuAd	Plano	Sem Aspecto	Área Urbana	Alcance Distante
OAzPaAd	Ondulado	Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
OFPaAd	Ondulado	Frontal	Pastagem	Alcance Distante
OAApaAd	Ondulado	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
ODPaAd	Ondulado	Dorsal	Pastagem	Alcance Distante
MAzPaAd	Montanhoso	Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
MFPaAd	Montanhoso	Frontal	Pastagem	Alcance Distante
MAaPaAd	Montanhoso	Anti-Azimutal	Pastagem	Alcance Distante
MDPaAd	Montanhoso	Dorsal	Pastagem	Alcance Distante

APÊNDICE B

ALGUNS TIPOS DE USO/COBERTURA DO SOLO LEVANTADOS



FIGURA B.1 - Levantamento em logradouro.



FIGURA B.2 - Levantamento em topo de edificação.



FIGURA B.3 - Levantamento em cultura de milho.



FIGURA B.4 - Levantamento em cultura de feijão.



FIGURA B.5 - Levantamento em cultura de arroz.



FIGURA B.6 - Levantamento em cultura de hortaliça.



FIGURA B.7 - Levantamento em cultura de mandioca.



FIGURA B.8 - Levantamento em capim baixo.



FIGURA B.9 - Levantamento em capim médio.



FIGURA B.10 - Levantamento em capim alto.

APÊNDICE C

LEGENDA DA IMAGEM DOS ESTRATOS

1	- PLANA/SEM ASPECTO/CULTURA/ALCANCE PRÓXIMO
2	- PLANA/SEM ASPECTO/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
3	- PLANA/SEM ASPECTO/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
4	- PLANA/SEM ASPECTO/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
5	- PLANA/SEM ASPECTO/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
6	- PLANA/SEM ASPECTO/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
7	- ONDULADA/AZIMUTAL/CULTURA/ALCANCE PRÓXIMO
8	- ONDULADA/AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
9	- ONDULADA/AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
10	- ONDULADA/AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
11	- ONDULADA/AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
12	- ONDULADA/AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
13	- ONDULADA/FRONTAL/CULTURA/ALCANCE PRÓXIMO
14	- ONDULADA/FRONTAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
15	- ONDULADA/FRONTAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
16	- ONDULADA/FRONTAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
17	- ONDULADA/FRONTAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
18	- ONDULADA/FRONTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
21	- ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
22	- ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
23	- ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
24	- ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
26	- ONDULADA/DORSAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
27	- ONDULADA/DORSAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
28	- ONDULADA/DORSAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
29	- ONDULADA/DORSAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
30	- ONDULADA/DORSAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
32	- MONTANHOSA/AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
33	- MONTANHOSA/AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
34	- MONTANHOSA/AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
35	- MONTANHOSA/AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
36	- MONTANHOSA/AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
38	- MONTANHOSA/FRONTAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
39	- MONTANHOSA/FRONTAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
40	- MONTANHOSA/FRONTAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
41	- MONTANHOSA/FRONTAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
42	- MONTANHOSA/FRONTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
44	- MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
45	- MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
46	- MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
47	- MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
48	- MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO
50	- MONTANHOSA/DORSAL/AGUA/ALCANCE PRÓXIMO
51	- MONTANHOSA/DORSAL/PASTAGEM/ALCANCE PRÓXIMO
52	- MONTANHOSA/DORSAL/FLORESTA/ALCANCE PRÓXIMO
53	- MONTANHOSA/DORSAL/AREA URBANA/ALCANCE PRÓXIMO
54	- MONTANHOSA/DORSAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE PRÓXIMO

FIGURA C.1 - Legenda dos estratos no alcance próximo.

- 55 - PLANA/SEM ASPECTO/CULTURA/ALCANCE DISTANTE
- 56 - PLANA/SEM ASPECTO/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 57 - PLANA/SEM ASPECTO/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 58 - PLANA/SEM ASPECTO/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 59 - PLANA/SEM ASPECTO/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 60 - PLANA/SEM ASPECTO/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 61 - ONDULADA/AZIMUTAL/CULTURA/ALCANCE DISTANTE
- 62 - ONDULADA/AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 63 - ONDULADA/AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 64 - ONDULADA/AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 65 - ONDULADA/AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 66 - ONDULADA/AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 67 - ONDULADA/FRONTAL/CULTURA/ALCANCE DISTANTE
- 68 - ONDULADA/FRONTAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 69 - ONDULADA/FRONTAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 70 - ONDULADA/FRONTAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 71 - ONDULADA/FRONTAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 72 - ONDULADA/FRONTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 73 - ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/CULTURA/ALCANCE DISTANTE
- 74 - ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 75 - ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 76 - ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 77 - ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 78 - ONDULADA/ANTI-AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 79 - ONDULADA/DORSAL/CULTURA/ALCANCE DISTANTE
- 80 - ONDULADA/DORSAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 81 - ONDULADA/DORSAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 82 - ONDULADA/DORSAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 83 - ONDULADA/DORSAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 84 - ONDULADA/DORSAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 86 - MONTANHOSA/AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 87 - MONTANHOSA/AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 88 - MONTANHOSA/AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 89 - MONTANHOSA/AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 90 - MONTANHOSA/AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 92 - MONTANHOSA/FRONTAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 93 - MONTANHOSA/FRONTAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 94 - MONTANHOSA/FRONTAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 95 - MONTANHOSA/FRONTAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 96 - MONTANHOSA/FRONTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 98 - MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 99 - MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 100 - MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 101 - MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 102 - MONTANHOSA/ANTI-AZIMUTAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE
- 104 - MONTANHOSA/DORSAL/AGUA/ALCANCE DISTANTE
- 105 - MONTANHOSA/DORSAL/PASTAGEM/ALCANCE DISTANTE
- 106 - MONTANHOSA/DORSAL/FLORESTA/ALCANCE DISTANTE
- 107 - MONTANHOSA/DORSAL/AREA URBANA/ALCANCE DISTANTE
- 108 - MONTANHOSA/DORSAL/SOLO EXPOSTO/ALCANCE DISTANTE

FIGURA C.2 - Legenda dos estratos no alcance distante.

APÊNDICE D

BOX PLOTS DOS ERROS DOS ESTRATOS COM MEDIANA COMO MEDIDA DA TENDÊNCIA CENTRAL E QUARTIS INFERIOR E SUPERIOR COMO COMPRIMENTO DO RETÂNGULO

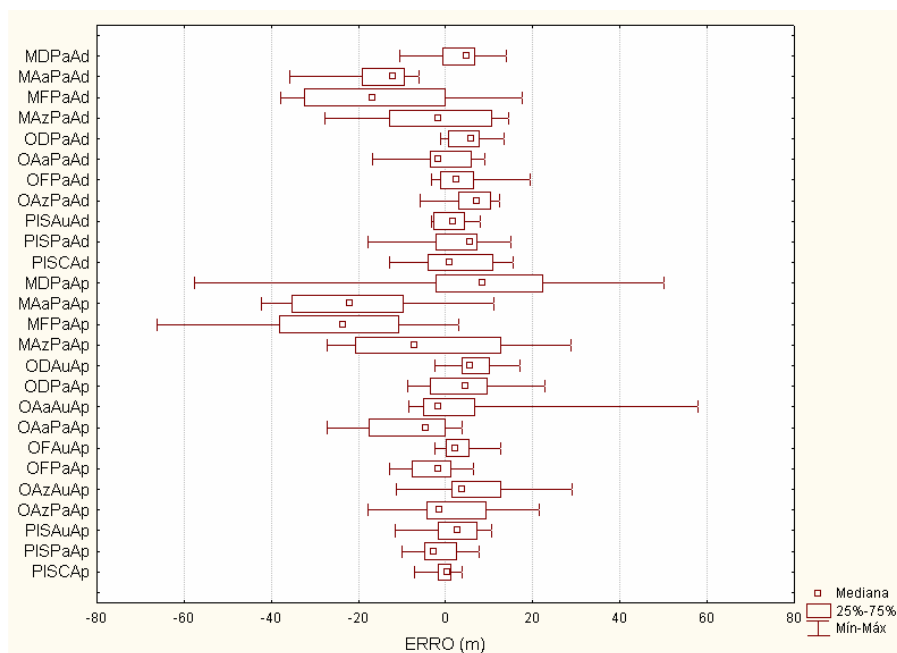


FIGURA D.1 - *Box plots* dos erros dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.

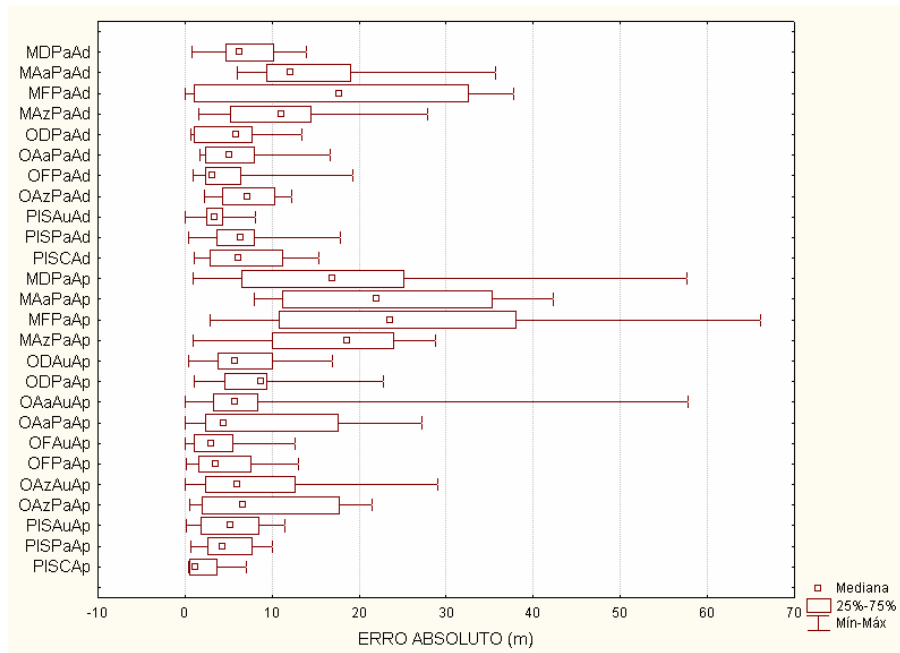


FIGURA D.2 - Box plots dos erros absolutos dos estratos, corrigidos da componente global da tendência.

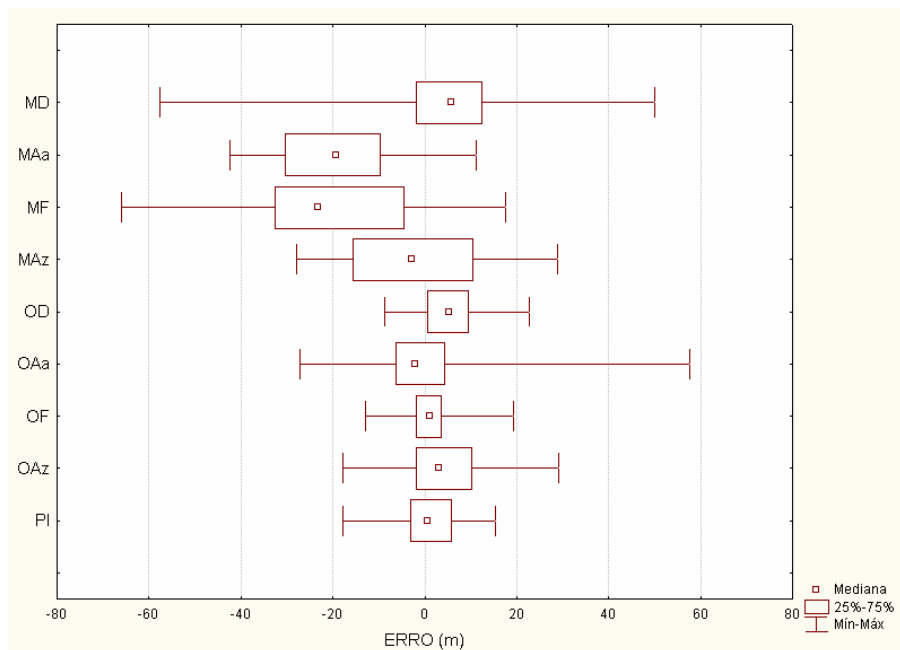


FIGURA D.3 - Box plots dos erros dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.

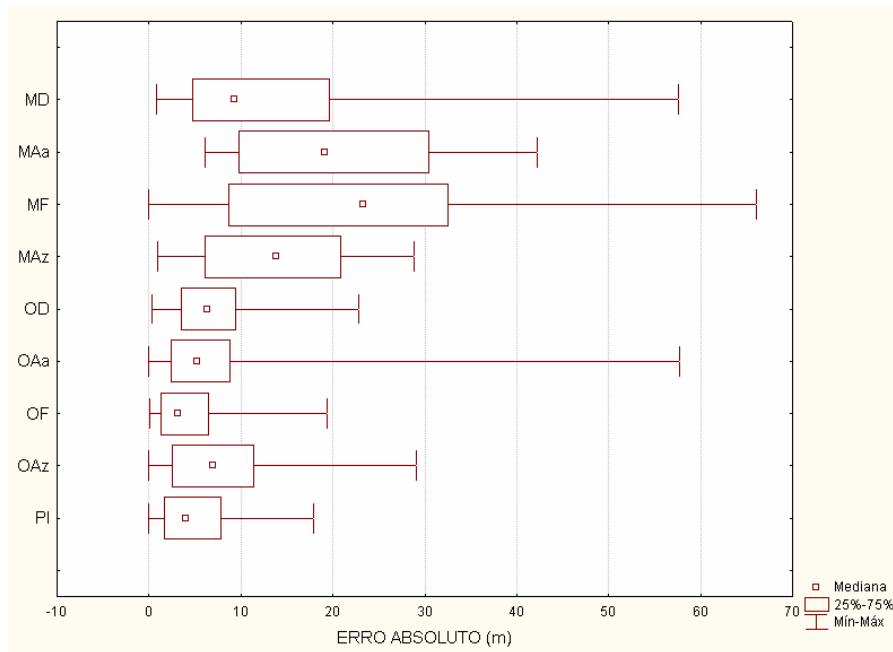


FIGURA D.4 - Box plots dos erros absolutos dos estratos sem as categorias de região em alcance e uso/ocupação do solo.

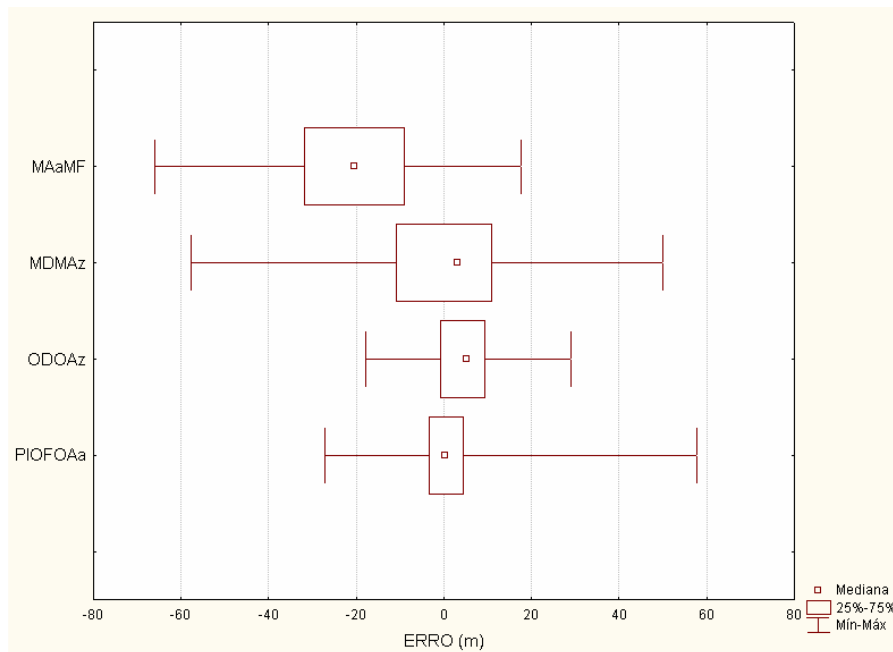


FIGURA D.5 - Box plots dos erros dos estratos agrupados.

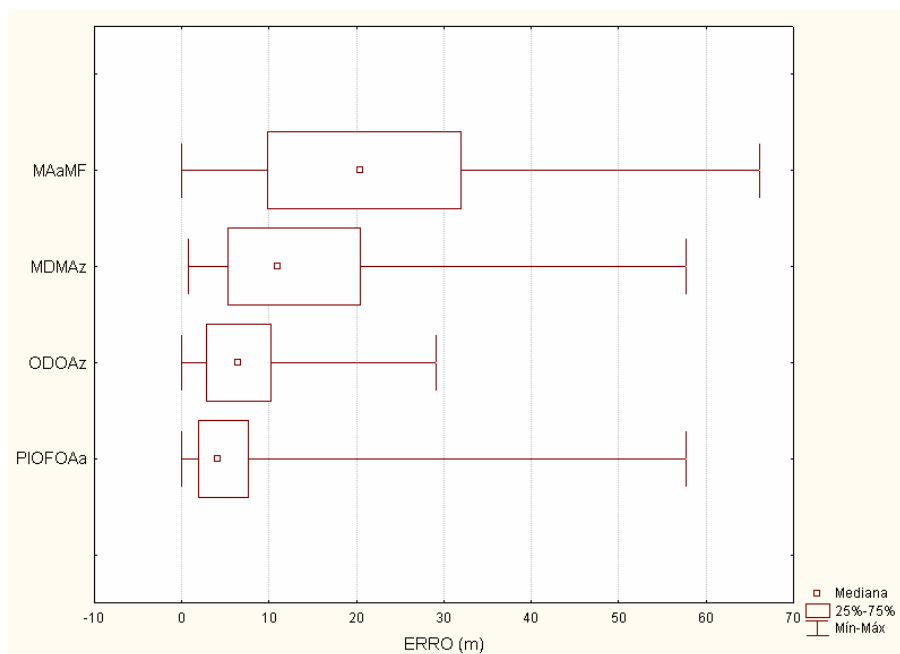


FIGURA D.6 - *Box plots* dos erros absolutos dos estratos agrupados.