

EXTRAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE:  
UM ESTUDO COMPARATIVO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
PIABANHA/RJ

Fábio Silva da Costa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2014

EXTRAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE:  
UM ESTUDO COMPARATIVO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
PIABANHA/RJ

Fábio Silva da Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

---

Prof. Jorge Luís Nunes e Silva Brito, Ph.D.

---

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo, D.Sc.

---

Dr. José Otávio Goulart Pecly, D.Sc.

---

Dr. Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2014

Costa, Fábio Silva da

Extração Fotogramétrica de Modelos Digitais de Superfície: Um Estudo Comparativo para a Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha/RJ/ Fábio Silva da Costa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XVII, 176 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Dissertação (mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 151-159.

1. Modelo Digital de Superfície (MDS) 2. Fotogrametria Digital 3. Bacia Hidrográfica do Piabanha I. Rotunno Filho, Otto Corrêa, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*- Todas as Glórias para Deus!*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar por todos os desafios que a vida me apresenta.

Agradeço aos meus queridos pais Arildon e Isis Costa, à minha avó Maria de Lourdes, ao meu padrinho Valdir e à minha amada esposa Fátima Andreia, que foi meu pilar de sustentação durante esse período tão complicado, pelo carinho e compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus orientadores, Otto Corrêa Rotunno Filho (Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ) e Jorge Luís Nunes e Silva Brito (Departamento de Engenharia Cartográfica da UERJ), pelo incentivo à proposta inicial do tema da dissertação e por todo o apoio dado ao longo deste trabalho.

Aos professores e membros examinadores, que me deram a honra de tê-los presentes na minha banca de defesa.

Aos professores e funcionários da Área de Recursos Hídricos e de Meio Ambiente do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, pelo apoio e conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela ajuda com a logística dos trabalhos de campo e a cessão dos dados cartográficos.

Agradeço ainda o suporte da FAPERJ pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE - FAPERJ 014/2010 (2010-2012), FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012, FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) –E-26/010.002980/2014 e ao CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 bem como à Secretaria de Educação Superior (SESu) – Ministério da Educação (MEC) - FNDE – Programa de Educação Tutorial - PET CIVIL UFRJ, à CPRM, à ANA, à EMBRAPA, ao CEPTEL, ao ONS e ao INMET, pelo contínuo apoio à pesquisa científica no Brasil e pelo fornecimento de dados, e ainda ao INPE, à ESA, à NASA e à NOAA, pelo fornecimento de imagens de sensoriamento remoto, que viabilizam o suporte e a divulgação de resultados de pesquisa em eventos da comunidade científica.

Ao meu chefe e amigo Paulo Bastos, pelo apoio e compreensão, e a todos os colegas da DICART.

Aos meus amigos cartógrafos Daniel Moreira, Rubens Kenup, Denilson de Jesus, Alceu Junior e Flavio Silva, à geógrafa Ana Paula Petito e à engenheira ambiental Alessandra Moreira por todo o incentivo e ajuda ao longo desta caminhada.

Ao meu grande amigo e pai na fé Edson Fernandes.

Aos professores e alunos da UERJ, em particular do curso de Engenharia Cartográfica, e à equipe de desenvolvimento do programa E-Foto.

A HEXAGON / SISGRAPH, através do engenheiro cartógrafo Wolmar Sabino, pela cessão da licença temporária do LPS.

E por fim ao meu “painho” e amigo Achilles Eduardo Guerra Monteiro (*in memoriam*).

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EXTRAÇÃO FOTOGAMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE:  
UM ESTUDO COMPARATIVO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
PIABANHA/RJ

Fábio Silva da Costa

Dezembro/2014

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Programa: Engenharia Civil

A aplicação de um modelo digital de superfície (MDS) corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema da elaboração e implantação de projetos hídrico-ambientais em diversas áreas. A partir do MDS, é possível calcular a área de um reservatório, desenhar perfis e seções transversais, delimitar bacias hidrográficas, gerar mapas de declividade, aspecto e suscetibilidade, além de estabelecer relações sinérgicas com variáveis hidrometeorológicas, como radiação solar incidente, temperatura, umidade do ar e ventos, entre outras. A fotogrametria digital, como processo fundamental à geração de produtos cartográficos para diversas aplicações, é objeto de grande interesse no âmbito acadêmico e comercial, tendo sido adotada, então, como ferramenta para a extração do MDS. Este trabalho propõe a extração do MDS através de duas estações fotogramétricas digitais, uma comercial, o LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), aplicativo do pacote ERDAS, e outra acadêmica, o E-FOTO (Estação Fotogramétrica Digital Educacional). Foram gerados 2 modelos pelo LPS e 2 pelo E-FOTO. Quando comparados com o MDS de referência (IBGE) e com MDS extraído de imagem SRTM, os resultados apontaram que os modelos gerados são capazes de atender perfeitamente a produção de produtos cartográficos e hidrológicos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PHOTOGRAMMETRIC EXTRACTION OF DIGITAL SURFACE MODELS:  
A COMPARATIVE STUDY FOR THE PIABANHA RIVER BASIN/RJ

Fábio Silva da Costa

December/2014

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho

Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Department: Civil Engineering

The application of a digital surface model (MDS) corresponds to a new way of approaching the problem of development and implementation of water and environmental projects in several areas. From the MDS, you can calculate the area of a reservoir, draw profiles and cross sections, delineate the boundaries of watersheds, generate maps of slope, aspect and susceptibility as well as establish synergistic relationships with hydrometeorological variables such as solar radiation, temperature, humidity and wind, among others. The digital photogrammetry is recognized as a fundamental process to the generation of cartographic products for various applications and it is subject of great interest in the academic and commercial field having been therefore adopted as a tool for the MDS extraction. This work proposes the extraction of MDS by two digital photogrammetric stations, namely the commercial LPS (Leica Photogrammetry Suite), part of the ERDAS application package, and the academic E-PHOTO (Photogrammetric Digital Educational Station). Two models were generated by LPS and two by E-PHOTO. Both approaches were compared with the reference MDS (IBGE) and with the MDS extracted from SRTM image. The results showed that the generated models are able to perfectly produce cartographic and hydrological products.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Considerações Gerais.....	1
1.2. Justificativa e Relevância.....	3
1.3. Objetivo .....	4
1.4. Área de Interesse.....	4
1.5. Breve Histórico de Estudos Realizados na Bacia do Piabanha .....	6
1.6. Estrutura do Texto .....	7
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - CARTOGRAFIA .....	10
2.1. Conceituação.....	10
2.2. Forma da Terra.....	10
2.3. <i>Datum</i> Horizontal e Vertical.....	11
2.4. Sistema Geodésico de Referência.....	13
2.4.1. Posição e Orientação do Elipsóide de Referência .....	14
2.5. Sistema de Projeção e Escala.....	15
2.6. Levantamentos .....	16
2.6.1. Levantamentos Geodésicos .....	17
2.7. GPS (Global Positioning System).....	17
2.8. Altitudes Ortométricas .....	17
2.9. <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM).....	18
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - FOTOGRAMETRIA .....	21
3.1. Câmaras Fotogramétricas .....	22
3.2. Imagens Fotográficas Aéreas.....	23
3.3. Estereoscopia .....	24
3.3.1. Paralaxe .....	24
3.4. Processo Fotogramétrico.....	28
3.4.1. Orientação Interior.....	28
3.4.2. Orientação Exterior.....	29

3.4.3.	Ressecção Espacial .....	30
3.4.4.	Interseção Espacial .....	31
3.5.	Fototriangulação .....	32
CAPÍTULO 4 - MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS) .....		34
4.1.	Aquisição de Dados .....	37
4.2.	Geração do MDS .....	39
4.3.	Métodos de Estruturação do MDS .....	40
4.3.1.	TIN ( <i>Triangular Irregular Network</i> ) X Grades Regulares.....	41
4.3.2.	TIN .....	41
4.3.2.1.	Triangulação de Delaunay e Polígonos de Voronoi.....	42
4.3.3.	Grade Regular.....	44
4.3.4.	Interpoladores .....	44
4.4.	Extração fotogramétrica do MDS .....	45
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA .....		47
5.1.	Aquisição de Dados .....	48
5.1.1.	Trabalhos de Campo .....	48
5.1.1.1.	Processamento dos Dados GPS dos Pontos de Campo .....	49
5.1.2.	Dados de Gabinete.....	50
5.1.2.1.	Informações Sobre o Vôo Aerofotogramétrico .....	50
5.1.2.2.	Fotografias Aéreas.....	50
5.1.2.3.	Base Cartográfica .....	51
5.2.	Processamento Fotogramétrico Digital e Extração do MDS nos Ambientes E-Foto e LPS .....	51
5.2.1.	E-Foto .....	52
5.2.2.	LPS ( <i>Leica Photogrammetry Suite</i> ).....	52
5.2.3.	Criação do Projeto Fotogramétrico.....	53
5.2.4.	Orientação Interior.....	53
5.2.5.	Fototriangulação .....	53
5.2.6.	Extração e Estruturação do Modelo Digital de Superfície .....	54

5.3. Análise dos Modelos Digitais de Superfície no ArcGIS .....	54
<b>CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIABANHA/RJ.....</b>	<b>55</b>
6.1. Área de Estudo.....	55
6.2. Fisiografia da Bacia .....	56
6.3. Uso e Ocupação do Solo .....	56
6.4. Clima e Regimes Pluviométricos e Hidrológicos .....	57
6.5. Processamento do Bloco Fotogramétrico e Extração do MDS no Ambiente E-Foto.....	58
6.5.1. Criação do Projeto Fotogramétrico.....	59
6.5.2. Orientação Interior.....	62
6.5.3. Orientação Exterior.....	63
6.5.4. Fototriangulação .....	63
6.5.5. Extração do Modelo Digital de Superfície .....	66
6.6. Processamento do Bloco Fotogramétrico e Extração do MDS no Ambiente LPS.....	68
6.6.1. Criação do Projeto Fotogramétrico.....	68
6.6.2. Orientação Interior.....	72
6.6.3. Fototriangulação .....	74
6.6.4. Extração do Modelo Digital de Superfície .....	76
6.7. Extração e Análise dos Modelos Digitais de Superfície no ArcGIS .....	77
6.7.1. Geração do MDS do IBGE.....	81
6.7.2. Aquisição do MDS da SRTM.....	82
<b>CAPÍTULO 7 - AVALIAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE.....</b>	<b>98</b>
7.1. Demonstração da qualidade do MDS do IBGE .....	98
7.2. Comparação entre os MDS do E-Foto e do IBGE.....	99
7.2.1. Análises Visual e Numérica .....	99
7.3. Comparação entre o MDS do LPS e do IBGE.....	104
7.4. Comparação entre o MDS do E-Foto e do LPS.....	109
7.5. Avaliação do MDS da SRTM.....	112

7.6.	Comparação entre os MDS do E-Foto e da SRTM .....	112
7.7.	Comparação entre o MDS do LPS e da SRTM .....	116
CAPÍTULO 8 - APLICAÇÕES EM HIDROLOGIA .....		119
8.1.	Aplicações dos Modelos Digitais de Superfície .....	119
8.2.	Mapa Hipsométrico.....	119
8.2.1.	Curva Hipsométrica.....	120
8.2.1.1.	Cálculo do Mapa Hipsométrico e da Curva Hipsométrica.....	120
8.3.	Declividade .....	123
8.3.1.	Cálculo da declividade.....	124
8.3.1.1.	Mapa de Declividade.....	125
8.4.	Mapa de Aspecto .....	128
8.4.1.	Cálculo do aspecto.....	129
8.5.	Mapa de Curvatura.....	131
8.5.1.	Cálculo da superfície de curvatura .....	132
8.6.	Delimitação de bacias hidrográficas .....	135
8.6.1.	Cálculo da delimitação da bacia hidrográfica.....	136
8.6.1.1.	Direção de fluxo ( <i>flow direction</i> ).....	139
8.6.1.2.	Fluxo acumulado ( <i>flow accumulation</i> ).....	140
8.6.2.	Delimitação de Bacias Hidrográficas na Área de Estudo.....	141
CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		146
9.1.	Conclusões .....	146
9.2.	Recomendações .....	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		151
ANEXO A - Certificado de Calibração da Câmara.....		160
ANEXO B - Fotografias Aéreas Utilizadas.....		165
ANEXO C - Relatórios do IBGE .....		166
APÊNDICE A - Tabelas Contendo os Pontos de Campo e RRNN.....		173
APÊNDICE A.1 - Tabela contendo as diferenças altimétricas entre os pontos de campo, as RRNN e os modelos digitais de superfície com resolução de 10 metros..173		



APÊNDICE A.2 - Tabela contendo as diferenças altimétricas entre os pontos de campo, as RRNN e os modelos digitais de superfície com resolução de 90 metros..	174
APÊNDICE B - Relatório Gerado no Processo Fotogramétrico do LPS .....	175
APÊNDICE C - Relatório Gerado no Processo Fotogramétrico do E-Foto.....	176

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Bacia hidrográfica do rio Piabanha.....	6
Figura 2.1 - Desvio da vertical .....	12
Figura 2.2 - Superfícies de referências para o geoposicionamento .....	14
Figura 2.3 - Altitudes ortométrica (H), geométrica (h) e da ondulação geoidal (N).....	18
Figura 3.1 - Sistema de coordenadas das marcas fiduciais.....	23
Figura 3.2 - Deslocamento devido à paralaxe .....	25
Figura 3.3 - Determinação da linha de vôo .....	26
Figura 3.4 - Medição de paralaxe estereoscópica.....	28
Figura 3.5 - Sistema de coordenadas em píxel .....	29
Figura 3.6 - Ângulos de atitude do avião $\phi$ , $\omega$ e $\kappa$ .....	30
Figura 3.7 - Cálculo da interseção espacial .....	32
Figura 3.8 - Bloco de 4 imagens fotográficas e seus feixes perspectivos .....	33
Figura 4.1- Diferença entre MDS e MDT .....	35
Figura 4.2 - Formas de aquisição do MDS .....	39
Figura 4.3 - Tipos de grade.....	41
Figura 4.4 - Triangulação de Delaunay e polígonos de Voronoi.....	42
Figura 5.1 - Fluxograma metodológico .....	48
Figura 5.2 - Fotografias aéreas cobrindo toda a área de estudo .....	51
Figura 5.3 - Fluxo de trabalho a ser seguido em um projeto fotogramétrico .....	52
Figura 6.1 - Área de estudo dentro da bacia hidrográfica do rio Piabanha .....	55
Figura 6.2 - Totais de precipitação mensal em Petrópolis/RJ .....	58
Figura 6.3 - Formulário com os dados iniciais do projeto E-Foto.....	59
Figura 6.4 - Formulário com dados do terreno.....	60
Figura 6.5 - Dados do sensor .....	61
Figura 6.6 - Dados do vôo .....	62
Figura 6.7 - Interface do módulo de orientação interior.....	63
Figura 6.8 - Interface do módulo de fototriangulação .....	64
Figura 6.9 - Interface do módulo de extração do MDS .....	66
Figura 6.10 - Adição de pontos fotogramétricos .....	67
Figura 6.11 - Escolha do procedimento de amostragem ( <i>downsampling</i> ) .....	68
Figura 6.12 - Escolha do modelo geométrico da câmara .....	69
Figura 6.13 - Número de marcas fiduciais e suas coordenadas.....	69

Figura 6.14 - Parâmetros da câmara fotogramétrica.....	70
Figura 6.15 - Seleção da projeção e <i>datum</i> adotado.....	70
Figura 6.16 - Procedimento para adição das imagens .....	71
Figura 6.17 - Propriedades do bloco fotogramétrico.....	71
Figura 6.18 - Direção de vôo.....	72
Figura 6.19 - Obtenção da orientação interior de forma automática.....	73
Figura 6.20 - Centro geométrico da marca fiducial e sua tabela correspondente.....	74
Figura 6.21 - Distribuição dos pontos de controle .....	75
Figura 6.22 - Valor do resíduo encontrado após a fototriangulação .....	76
Figura 6.23 - Grade de espaçamento de 10 metros.....	76
Figura 6.24 - Seleção da estratégia utilizada na extração do MDS.....	77
Figura 6.25 - Nuvem de pontos não estruturada transformada em <i>shape</i> .....	78
Figura 6.26 - Nuvem de pontos estruturada com espaçamento de grade de 10 metros para o E-Foto .....	79
Figura 6.27 - Nuvem de pontos estruturada com espaçamento de grade de 90 metros para o E-Foto .....	79
Figura 6.28 - Nuvem de pontos importadas do LPS com espaçamento de grade de.....	80
Figura 6.29 - Nuvem de pontos importadas do LPS com espaçamento de grade de.....	80
Figura 6.30 - MDS do IBGE com 10 metros de espaçamento de grade.....	82
Figura 6.31 - MDS da SRTM com 90 metros de espaçamento de grade .....	84
Figura 6.32 - MDS do E-Foto com 10 metros de espaçamento de grade.....	86
Figura 6.33 - MDS do E-Foto com 90 metros de espaçamento de grade.....	87
Figura 6.34 - MDS do LPS com 10 metros de espaçamento de grade.....	88
Figura 6.35 - MDS do LPS com 90 metros de espaçamento de grade .....	89
Figura 6.36 - Matriz ( <i>raster</i> ) do E-Foto com 10 metros de espaçamento de grade.....	91
Figura 6.37 - Matriz ( <i>raster</i> ) do E-Foto com 90 metros de espaçamento de grade.....	92
Figura 6.38 - Matriz ( <i>raster</i> ) do LPS com 10 metros de espaçamento de grade.....	93
Figura 6.39 - Matriz ( <i>raster</i> ) do LPS com 90 metros de espaçamento de grade.....	94
Figura 6.40 - Matriz ( <i>raster</i> ) do IBGE com 10 metros de espaçamento de grade .....	95
Figura 6.41 - Matriz ( <i>raster</i> ) da SRTM com 90 metros de espaçamento de grade .....	96
Figura 7.1 - Análise visual do MDS extraído do E-Foto.....	100
Figura 7.2 - Mapa de diferenças entre o MDS do IBGE e do E-Foto .....	102
Figura 7.3 - Análise visual do MDS extraído do LPS.....	105
Figura 7.4 - Mapa de diferenças entre MDS do IBGE e do LPS .....	107

Figura 7.5 - Mapa de diferenças entre MDS do E-Foto e do LPS.....	110
Figura 7.6 - Mapa de diferenças entre MDS do E-Foto e da SRTM.....	114
Figura 7.7- Mapa de diferenças entre MDS do LPS e da SRTM .....	117
Figura 8.1 - Mapa hipsométrico gerado pelo MDS do E-Foto.....	121
Figura 8.2 - Mapa hipsométrico gerado pelo MDS do LPS .....	122
Figura 8.3 - Curva hipsométrica gerada por cada MDS .....	123
Figura 8.4 - Distribuição dos elementos na grade .....	124
Figura 8.5 - Mapa de declividade gerado pelo MDS do E-Foto.....	126
Figura 8.6 - Mapa de declividade gerado pelo MDS do LPS.....	127
Figura 8.7 - Curvas de declividade geradas pelos modelos do LPS e do E-Foto.....	128
Figura 8.8 - Oito possíveis direções de fluxo no cálculo do aspecto.....	128
Figura 8.9 - Direção do aspecto.....	129
Figura 8.10 - Mapa de aspecto gerado pelo MDS do E-Foto.....	130
Figura 8.11 - Mapa de aspecto gerado pelo MDS do LPS .....	131
Figura 8.12 - Janela de 3x3 células .....	133
Figura 8.13 - Mapa de curvatura gerado pelo MDS do E-Foto.....	134
Figura 8.14 - Mapa de curvatura gerado pelo MDS do LPS .....	135
Figura 8.15 - Correção de erros do tipo <i>sink</i> .....	137
Figura 8.16 - Mapa do MDS do LPS obtido após o tratamento de dados.....	138
Figura 8.17 - Exemplo de execução da função <i>flow direction</i> .....	139
Figura 8.18 - Mapa de direção de fluxo.....	140
Figura 8.19 - Determinação do fluxo acumulado.....	141
Figura 8.20 - Bacias delimitadas utilizando o MDS do E-Foto com 90 metros de espaçamento de grade .....	142
Figura 8.21 - Bacias delimitadas utilizando o MDS do LPS com 90 metros de espaçamento de grade .....	143
Figura 8.22 - Bacias delimitadas utilizando o MDS da SRTM com 90 metros de espaçamento de grade .....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Pontos de campo após o processamento GPS .....	49
Tabela 7.1 - Erros altimétricos do modelo do IBGE com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m) .....	98
Tabela 7.2 - Diferenças altimétricas entre o MDS do E-Foto e do IBGE.....	103
Tabela 7.3 - Erros altimétricos do modelo do E-Foto com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m) .....	103
Tabela 7.4 - Comparação dos erros altimétricos entre os modelos do E-Foto e IBGE com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m).	104
Tabela 7.5 - Diferenças altimétricas entre o MDS do LPS e do IBGE .....	108
Tabela 7.6 - Erros altimétricos do modelo do LPS com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m).....	108
Tabela 7.7 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos do IBGE e LPS com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m).....	109
Tabela 7.8 - Diferenças altimétricas entre o MDS do E-Foto e do LPS .....	111
Tabela 7.9 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos do IBGE, E-Foto e LPS com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m).....	111
Tabela 7.10 - Erros altimétricos do modelo da SRTM com o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade (MDS 90 m) .....	112
Tabela 7.11 - Diferenças altimétricas entre o MDS da SRTM e do E-Foto.....	115
Tabela 7.12 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos da SRTM e do E-Foto com o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade (MDS 90 m).....	115
Tabela 7.13 - Diferenças altimétricas entre o MDS da SRTM e do LPS .....	118
Tabela 7.14 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos da SRTM e do LPS com o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade (MDS 90 m).	118
Tabela 8.1 - Classificação da declividade .....	125
Tabela 8.2 - Diferenças em entre as bacias geradas pelos modelos da SRTM , LPS e	145

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Gerais

O conceito de bacia hidrográfica segundo NAGHETTINI (2006) é de uma unidade fisiográfica, limitada por divisores topográficos, que recolhe a precipitação, age como um reservatório de água e sedimentos, defluindo-os em uma seção fluvial única, denominada exutório. Nos estudos de uma bacia hidrográfica, são introduzidos conceitos de cartografia importantes para a representação dos elementos constituintes do relevo terrestre, tema principal desta dissertação.

O reconhecimento das formas presentes do relevo dá-se através das curvas de nível, que, segundo o IBGE (1999), constitui uma linha imaginária do terreno, em que todos os pontos de referida linha têm a mesma altitude, acima ou abaixo de uma determinada superfície da referência, geralmente o nível médio do mar. Logo, através das curvas de nível, é possível identificar a forma do terreno, além da direção das águas.

Segundo ROCHA (2000), a técnica clássica utilizada para representar o relevo de uma superfície terrestre é o traçado das curvas de nível a partir de um levantamento topográfico ou fotogramétrico. Com o desenvolvimento da computação digital, novas técnicas surgiram permitindo a automatização desse procedimento, que consiste na descrição matemática do terreno por meio de uma função de interpolação, a qual se denomina modelo digital de superfície (MDS).

A modelagem digital do terreno é um conceito relativamente novo. As primeiras pesquisas, nesta área, são do professor Charles L. Miller, do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), por volta de 1955, tendo como objetivo principal a execução de projetos de estradas auxiliados por computação. Nessas pesquisas, eram criados modelos altimétricos do terreno a partir de pontos de altitudes obtidas por métodos fotogramétricos, espaçados a intervalos regulares (BRITO e COELHO, 2007).

O novo conceito de mapeamento em linhas de produção cartográfica envolve a idéia da geração de modelos digitais de superfície por métodos de processamento fotogramétrico digital, em particular a do relevo terrestre, e não mais apenas as técnicas de digitalização e rotulação de curvas de nível analógicas presentes em cartas topográficas impressas em base de poliéster. O MDS pode ser definido como qualquer

representação numérica para uma determinada superfície física do terreno (relevo, por exemplo) a ser representada (BRITO et al., 1999).

O desenvolvimento da fotogrametria digital tornou possível a automatização das etapas de extração de um MDS, tornando o processo técnica e economicamente mais viável, se comparado com os tradicionalmente utilizados. Com as técnicas de fotogrametria digital, podem ser empregados algoritmos de correlação automática de imagens digitais, algoritmos de crescimento automático de regiões, dentre outros.

Através da fotogrametria é possível extrair elementos geográficos específicos para diversas aplicações. De posse do mapeamento fotogramétrico, várias ações podem ser tomadas, tais como o estudo de bacias hidrográficas, planejamento costeiro, estudos de potencial hidrelétrico, planejamento urbano, planejamento e construção de estradas, entre outras.

Atualmente, pode-se dizer que o estado-da-arte em fotogrametria digital é o mapeamento semiautomático, ou seja, ainda exige a supervisão e eventual intervenção humana. O equipamento capaz de executar o conjunto de tarefas que compõem o processo fotogramétrico é denominado de estação fotogramétrica digital (EFD). Um sistema como esse, em geral, segundo BRITO e COELHO (2007), é composto de:

- a) monitor(es) de vídeo;
- b) dispositivo de visão estereoscópica;
- c) óculos, monitores especiais, entre outros;
- d) CPU gráfica ou placa de vídeo especial;
- e) CPU geral;
- f) periféricos de entrada/saída - teclado, *mouse*, *scanner*, mesa digitalizadora, *plotter* e/ou impressora;
- g) dispositivo de medição estereoscópica: *trackball*, *topo-mouse* etc.;
- h) módulos de código computacional dedicados às operações fotogramétricas, tais como: orientação interior, orientação relativa e orientação absoluta, ou orientação exterior (relativa e absoluta, simultaneamente), fototriangulação (medição e cálculo), restituição, retificação e reamostragem de imagens, extração de modelos digitais do terreno, geração de ortoimagens, integração com sistemas de informação geográfica, entre outras.

A vantagem com o advento das estações fotogramétricas digitais e dos programas de fotogrametria digital é a possibilidade de concentrar todas as rotinas em um só computador, poupando espaço e ganhando agilidade e tempo de operação em relação aos equipamentos fotogramétricos óptico-mecânicos.

Para demonstrar o uso das estações fotogramétricas digitais e dos programas de fotogrametria digital para a geração semiautomática de um MDS, este trabalho propõe a avaliação da qualidade do MDS gerado, utilizando, para isso, ferramentas de cartografia e adotando uma área da bacia hidrográfica do rio Piabanha como estudo de caso, que consiste em região com grande importância social e econômica, na qual recentemente têm sido realizados alguns estudos acadêmico-científicos.

## **1.2. Justificativa e Relevância**

A escolha da bacia hidrográfica do Piabanha como área experimental do estudo foi motivada por seu relevo montanhoso com desafios nas áreas de hidrologia, de sensoriamento remoto e aerofotogrametria. Ressaltam-se aspectos como os frequentes desastres naturais causados por eventos hidrológicos extremos, cujos efeitos são ampliados pelo mau uso e ocupação do solo. Dentre esses eventos, destacam-se as chuvas ocorridas em janeiro de 2011, que abrangeram parte da região serrana do estado do Rio de Janeiro, causando várias centenas de mortes. Apesar da imprevisibilidade atual, em certo grau, de grandes eventos meteorológicos, a falta de conhecimento e posterior gestão das áreas de risco da bacia certamente contribuíram para o aumento das proporções do desastre ocorrido na região.

Outros fatores relevantes para a sua escolha no presente estudo foram a composição de ambientes urbanos, agrícolas e florestados para desenvolvimento de estudos de parametrização hidrológica, uma vez que a região contém parte significativa da mata Atlântica nativa do estado do Rio de Janeiro, além de representar porção com produção agrícola importante para o estado.

A importância dos estudos desenvolvidos junto ao Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH<sub>2</sub>O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ e no âmbito do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) estimulou o suporte ao projeto Estudos Integrados de Bacias Experimentais da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (EIBEX), recentemente contemplado em chamada da FAPERJ. . Nesse



sentido, nesta pesquisa, caracterizou-se a relevância da engenharia cartográfica, particularmente da Fotogrametria, ao projeto EIBEX.

A geração de modelos digitais de superfície que descrevam o terreno em escalas representativas são produtos de partida no mapeamento das áreas de risco para a proteção das florestas, definição de áreas inundáveis, recuperação de áreas degradadas, planejamento e controle do parcelamento do solo urbano. Uma vez que a topografia da bacia do rio Piabanha favorece a deslizamentos e movimentos de massa por se constituir de montanhas e serras íngremes, agravadas pelas ações antrópicas, nota-se a importância da geração, da resolução espacial e da precisão altimétrica de um MDS, características fundamentais para uma correta utilização em estudos hidrológicos.

O MDS é um elemento central no balanço hídrico de massa e no balanço de energia. A partir dele é possível representar as características físicas da bacia hidrográfica, aprimorando a modelagem hidrológica e hidrodinâmica, cujo produto final é, entre outros, a previsão de inundações em áreas habitadas e a ocorrência de movimentos de massa, evitando perdas dos recursos naturais e principalmente de vidas.

### **1.3. Objetivo**

O objetivo geral desta dissertação consiste em avaliar a extração e qualidade de um modelo digital de superfície capaz de atender com precisão o desenvolvimento de análises topográficas em aplicações na escala de uma bacia hidrográfica.

Como objetivos específicos, apontam-se:

1. geração de modelos digitais de superfície a partir de duas estações fotogramétricas digitais, sendo uma acadêmica, a estação fotogramétrica digital educacional (E-Foto), e outra comercial, a *Leica Photogrammetry Suite* (LPS);
2. desenvolvimento de produtos cartográficos em ambiente SIG com potencial de aplicação em recursos hídricos e meio ambiente.

### **1.4. Área de Interesse**

Segundo dados do relatório do EIBEX-I (2010), a bacia hidrográfica do rio Piabanha tem uma área de drenagem de, aproximadamente, 2.050 km<sup>2</sup>, abrangendo os municípios da região serrana do norte do estado do Rio de Janeiro: Areal, Petrópolis,

São José do Vale do Rio Preto, Teresópolis, e ainda parte dos municípios de Três Rios, Paraíba do Sul e Paty do Alferes (Figura 1.1). Está localizada geograficamente entre as coordenadas 22° 06' S e 22° 33' S; 43° 23' O e 42° 41' O.

A bacia com 74 km de extensão é uma das maiores e mais importantes sub-bacias formadoras do rio Paraíba do Sul em seu trecho fluminense, abrangendo uma das mais desenvolvidas áreas industriais do país (SEMADS, 2001).

O rio Piabanha tem cerca de 80 km de extensão e banha os municípios de Areal, Petrópolis e Três Rios. Seus principais afluentes são os rios Fagundes, pela margem esquerda, e os rios Paquequer e Preto, pela margem direita. Sua nascente encontra-se na Serra do Mar, a 1.546 metros de altitude, no município de Petrópolis, e desemboca no rio Paraíba do Sul, já no município de Três Rios.

Devido à proximidade com o município do Rio de Janeiro, ocorreu um crescimento urbano acentuado e inadequado para as suas condições ambientais. Segundo ROSÁRIO (2013), a bacia hidrográfica do rio Piabanha abrange uma das mais desenvolvidas áreas do interior do estado do Rio de Janeiro e reflete, hoje, todo o processo histórico de ocupação, caracterizado pela descontinuidade dos ciclos econômicos, pelos desníveis socioeconômicos regionais e pela degradação ambiental, com efluentes domésticos e industriais sem tratamento adequado, lixões, desmatamento e erosão, uso indevido e não controlado de agrotóxicos, a falta de consciência ambiental.

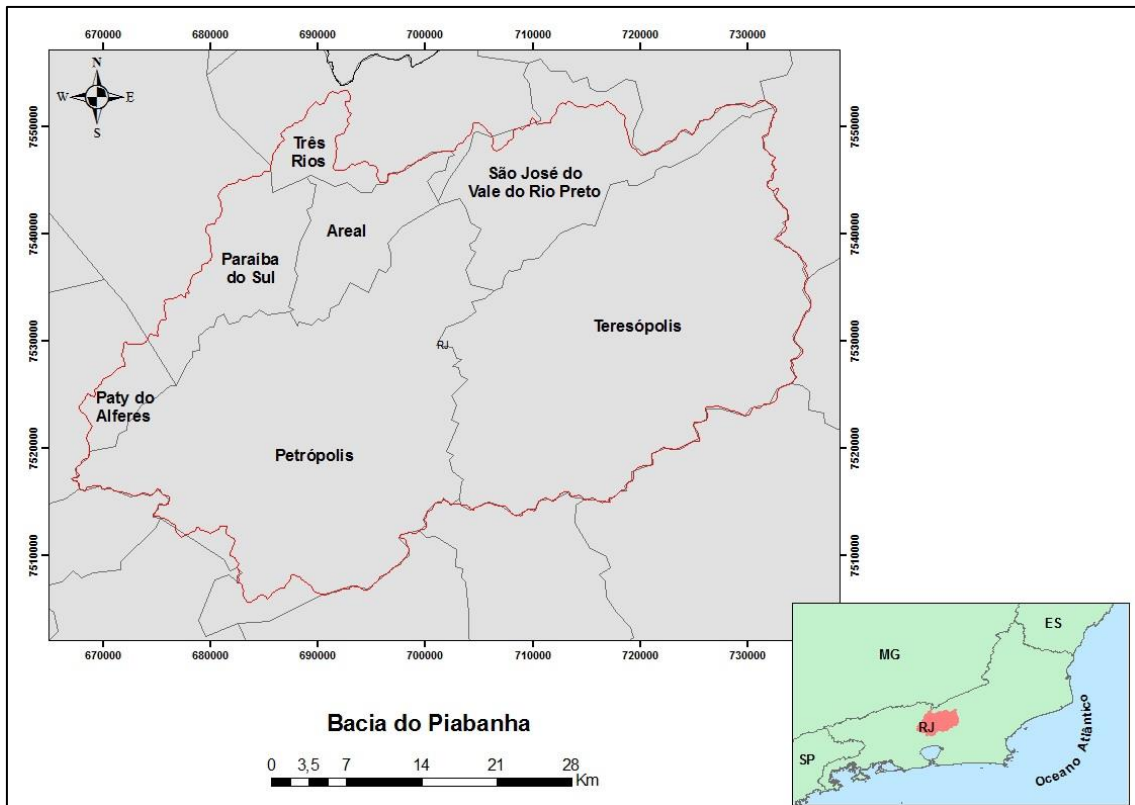


Figura 1.1 - Bacia hidrográfica do rio Piabanha

Fonte: ROSÁRIO (2013)

### 1.5. Breve Histórico de Estudos Realizados na Bacia do Piabanha

Algumas pesquisas realizadas na bacia do rio Piabanha, como a de KLING (2005), confirmam sua grande importância dentro do estado do Rio de Janeiro. O autor avaliou os impactos ambientais que originam a poluição e o comprometimento dos recursos naturais da bacia do rio Piabanha, consequência da urbanização ocorrida nas cidades que são formadoras da bacia hidrográfica. Já GONÇALVES (2008) analisou a estimativa de parâmetros hidrológicos para a sub-bacia de Pedro do Rio, município de Petrópolis/RJ, localizada na bacia do rio Piabanha, realizando uma modelagem hidrológica usando os modelos SMAP e TOPMODEL. Na mesma linha de pesquisa de GONÇALVES (2008), LOU (2010) executou um diagnóstico na mesma sub-bacia utilizando um modelo de células desenvolvido na COPPE/UFRJ, chamado MODCEL, com o intuito de simular o escoamento do rio Piabanha. Os resultados do MODCEL foram comparados com os resultados obtidos a partir dos modelos SMAP e TOPMODEL.

A bacia do rio Piabanha tem um histórico de utilização intensiva da água, principalmente em função das indústrias instaladas próximas às suas margens e dos despejos brutos que recebe das cidades. Na caracterização da qualidade da água, são necessários estudos rigorosos sobre o impacto desses usos. Nessa linha de trabalho, é que PAULA (2011) realizou um diagnóstico e avaliou as condições atuais e futuras da qualidade da água da bacia do rio Piabanha. A partir dos dados e informações disponíveis, foi implementado um modelo matemático unidimensional em condições estacionárias, no trecho do rio Piabanha entre as localidades de Petrópolis e Três Rios, para avaliação de parâmetros de qualidade da água. MOLINARI (2011) avaliou a vazão ecológica do ponto de vista da qualidade das águas na bacia do rio Piabanha, utilizando o parâmetro da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) para a avaliação, devido à grande carga orgânica lançada nessa área.

A utilização do sensoriamento remoto é uma constante ferramenta de apoio a pesquisas na bacia do Piabanha. Esse procedimento é verificado no trabalho de BARROS (2012), que utilizou dados do satélite Landsat5-TM e o algoritmo SEBAL para estimar a evapotranspiração e os componentes do balanço de energia. Por outro lado, ROSÁRIO (2013) propôs a caracterização da bacia do rio Piabanha através do mapa de uso e cobertura da terra para a escala 1:25.000, utilizando o sensor AVNIR do satélite japonês ALOS.

## **1.6. Estrutura do Texto**

Esta dissertação está estruturada em nove Capítulos, incluindo o Capítulo introdutório, que apresenta a contextualização do tema abordado e a motivação do seu desenvolvimento. Adicionalmente, apresenta o objetivo do trabalho, uma breve retrospectiva histórica de trabalhos desenvolvidos na região da bacia hidrográfica do rio Piabanha e, ao final, a estruturação e organização do documento.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica pertinente a noções de cartografia. Discorre-se sobre alguns conceitos cartográficos importantes para a elaboração deste trabalho, como o geóide, o *datum* horizontal, o *datum* vertical e a importância de um sistema geodésico de referência, envolvendo o elipsóide. Aborda-se, também, a importância das projeções cartográficas, dos conceitos de escala e das referências altimétricas.

No Capítulo 3, por sua vez, destacam-se fundamentos teóricos correlatos a informações fotogramétricas. Apresentam-se o histórico e conceitos da fotogrametria e a correspondente evolução de suas técnicas. Descreve-se o que são câmaras fotogramétricas, imagens aéreas, estereoscópica e paralaxe, concentrando-se, em sua parte final, nos aspectos relevantes do processo fotogramétrico digital para a extração do modelo digital de superfície (MDS).

O Capítulo 4 revisa, em especial, a literatura com enfoque nos modelos digitais de superfície, incluindo o respectivo histórico do surgimento desses modelos. Descreve, de forma abrangente, o processo que começa com a aquisição de dados, passando pela geração, estruturação e, finalmente, pela extração do MDS.

No Capítulo 5, discute-se a concepção da abordagem metodológica utilizada na aquisição dos dados de campo e de gabinete que serviram de dados de entrada para as estações fotográficas digitais (EFD), mais especificamente, no código computacional do E-Foto e do módulo LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), bem como no processo fotogramétrico que deve ser por elas cumprido até a extração e a exportação do MDS.

Já o Capítulo 6 apresenta o estudo de caso, ou seja, a caracterização da bacia hidrográfica do rio Piabanha, onde é relatada toda a rotina de trabalho nas EFD para a extração do MDS, primeiramente no E-Foto e posteriormente no LPS. Além disso, apresenta-se a exportação e a criação da nuvem de pontos de cada MDS nas resoluções de grade de 10 metros e de 90 metros no ambiente ArcGIS. São também descritos os critérios das avaliações perante as quais os modelos serão submetidos para avaliação da qualidade.

O Capítulo 7 apresenta os critérios adotados na análise dos modelos digitais de superfície gerados pelo processo fotogramétrico. Enfocam-se, ainda, os resultados obtidos mediante a comparação de cada MDS extraído (E-Foto e LPS) face ao modelo de referência (IBGE) e face ao MDS da imagem SRTM. Em especial, abordam-se, também, os pontos coletados em campo na comparação altimétrica com os seus homólogos em cada MDS para a obtenção dos resultados finais.

Em relação ao Capítulo 8, são apresentadas algumas aplicações em hidrologia dos MDS, julgadas relevantes para o contexto no qual esta dissertação se insere, como,

por exemplo, a geração de mapas de declividade, aspecto, curvatura e hipsométrico, além da delimitação de bacias hidrográficas na área de estudo.

Finalmente, o Capítulo 9 encerra a dissertação apresentando uma síntese com as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, assim como as recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

## **CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - CARTOGRAFIA**

### **2.1. Conceituação**

O conceito de Cartografia tem suas origens intimamente ligadas às inquietações que sempre se manifestaram no ser humano, no tocante ao conhecimento e ao registro do mundo em que habita.

Em 1949, a Organização das Nações Unidas reconhece a importância da Cartografia através da seguinte assertiva, lavrada em Atas e Anais: "CARTOGRAFIA - no sentido lato da palavra, não é apenas uma das ferramentas básicas do desenvolvimento econômico, mas é a primeira ferramenta a ser usada antes que outras ferramentas possam ser postas em trabalho".

A Cartografia é uma ciência milenar que tem por finalidade a aquisição, processamento, representação e análise de dados geoespaciais. A sua automatização, ao longo dos anos, facilitou o processo cartográfico, o qual parte da coleta de dados, envolve estudos, análises, composição e representação de observações, de fatos, fenômenos e dados pertinentes a diversos campos científicos associados à superfície planetária, como por exemplo, um MDS.

Um conceito cartográfico importante é o de sistema geodésico, onde as posições dos pontos na superfície física da Terra devem estar ligadas a uma superfície matemática de referência, geralmente um elipsóide.

### **2.2. Forma da Terra**

O formato e as dimensões da Terra constituem um tema que vem sendo pesquisado ao longo dos anos em várias partes do mundo. Muitas foram as interpretações e os conceitos desenvolvidos para definir qual seria a forma do nosso planeta. Pitágoras, em 528 a.C., introduziu o conceito de forma esférica para o planeta. Dessa forma, sucessivas teorias foram desenvolvidas até que se alcançasse o conceito que é, hoje, bem aceito no meio científico internacional.

A Terra gira em torno do seu eixo, e sua forma é o resultado da interação de forças internas e externas (gravidade, força centrífuga, movimentos tectônicos, condições climáticas, erosão, entre outras). Essas forças produzem, na superfície

terrestre, uma série de irregularidades que formam a superfície topográfica da Terra, como as montanhas, os vales, os planaltos e as planícies.

Essas irregularidades são muito pequenas quando comparadas ao tamanho e ao volume do planeta. Porém essa superfície aparente tem importância relevante para os profissionais das geociências, particularmente para os topógrafos, geodestas, geólogos e os hidrólogos, já que todas as medições e estudos de diversas finalidades serão realizados sobre a superfície física da Terra. Além desse fato, as irregularidades da superfície terrestre trazem muitas dificuldades na realização de cálculos matemáticos sobre tal superfície. Para fins práticos, torna-se necessário encontrar um modelo representativo da superfície física da Terra (SMITH, 1996).

Um modelo com significado físico é o geóide, cuja superfície é a equipotencial, que mais se aproxima do nível médio dos mares (GEMAEI, 1999). A adoção do geóide como superfície matemática de referência esbarra no conhecimento limitado do campo da gravidade terrestre. Além disso, o equacionamento matemático do geóide é complexo, o que o distancia de um uso mais prático como referência geométrica. Logo, não é conveniente para servir como superfície de referência para as chamadas redes geodésicas horizontais (VANICEK e KRAKIWSKY, 1986).

Pelas razões acima expostas, é adotada, para a condução dos cálculos, uma superfície de referência que seja um modelo matematicamente viável, do ponto de vista geométrico. Trata-se do elipsóide de revolução ou biaxial, que fica definido por apenas dois parâmetros, usualmente o semieixo maior “*a*” e o achatamento “*f*”. Como exemplo, pode-se citar o WGS84, com  $a = 6.378.137$  m e  $f = 298,257223563$  m.

### **2.3. Datum Horizontal e Vertical**

Todas as medidas realizadas sobre a superfície topográfica podem facilmente ser reduzidas ao geóide. Para os cálculos executados, será considerada uma superfície matemática, o elipsóide. Contudo sabe-se que as verticais ao geóide e ao elipsóide, em um mesmo ponto, como regra, não coincidem. Elas têm direções diferentes, formando entre si um ângulo chamado de desvio da vertical. Caso os cálculos fossem executados sem o devido cuidado com o problema ora em tela, seus resultados conteriam erros que influenciariam na representação final do terreno (Figura 2.1).



Deste modo, a Topografia utiliza, para a origem de seu referencial, um ponto onde exista a coincidência da superfície do geóide com a do elipsoide de referência, isto é, onde o desvio da vertical é nulo ou mínimo; o *datum* horizontal ou planimétrico.

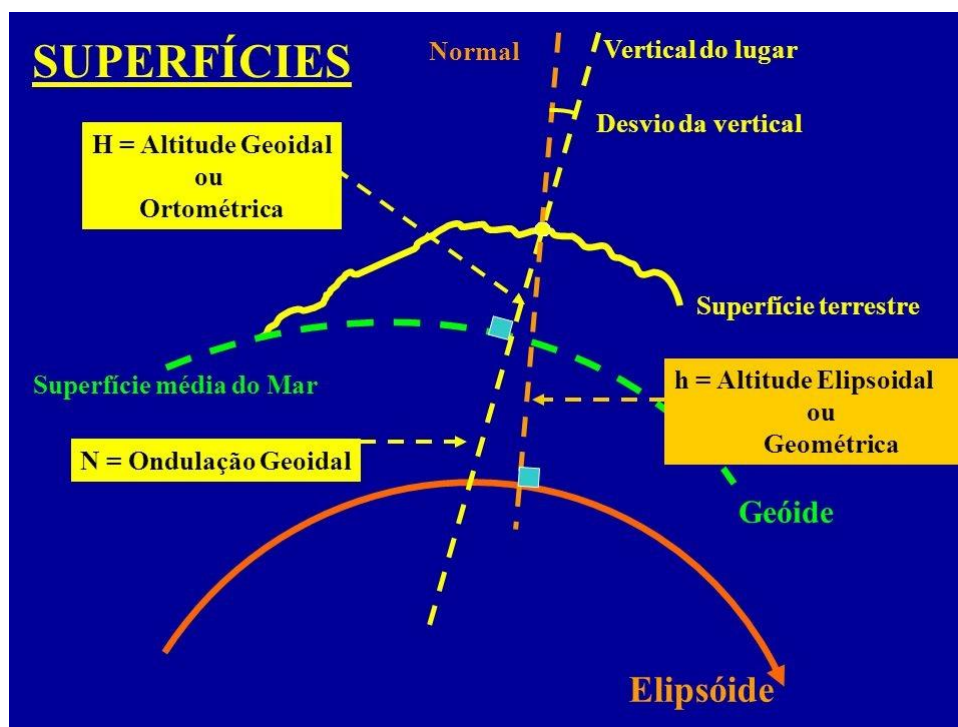


Figura 2.1 - Desvio da vertical

Fonte: Slide Player; <http://slideplayer.com.br/slide/380247>  
(acessado em 03/10/2013)

No período do mapeamento sistemático, até o ano de 1979, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) adotavam o *datum* planimétrico Córrego Alegre. Posteriormente, passou a ser utilizado, como referência, o *datum* horizontal SAD69 (*South American Datum 1969*).

Desde 2005, por recomendação do IBGE, é utilizado o *datum* horizontal SIRGAS2000, através da resolução do presidente do IBGE N°1/2005, onde é alterada a caracterização do sistema geodésico brasileiro. Atualmente, a comunidade cartográfica brasileira, em um período de transição de 10 anos, poderá ainda utilizar o SAD69 com a recomendação de que novos trabalhos sejam feitos já no novo sistema geodésico.

Desde o estabelecimento do sistema GPS (*Global Positioning System*), é comum o uso do *datum* planimétrico geocêntrico WGS84 (*World Geodetic System 1984*), com o objetivo de fornecer posicionamento e navegação em qualquer parte do mundo.

O geóide é definido como a superfície equipotencial que melhor se ajusta ao nível médio dos mares (NMM). A origem das altitudes ou *datum* altimétrico ou vertical é a superfície formada pelo NMM, um ponto fixo fundamentado e materializado, utilizado como partida e referência das altitudes que são determinadas pela linha de nivelamento geométrico (IBGE, 1997).

No Brasil, o nível médio dos mares é definido pelas observações maregráficas tomadas entre os anos de 1949 e 1957 no porto de Imbituba, no litoral do estado de Santa Catarina.

## **2.4. Sistema Geodésico de Referência**

É um sistema coordenado utilizado para representar características terrestres, sejam elas geométricas ou físicas. Na prática, serve para a obtenção de coordenadas geográficas (latitude e longitude), que possibilitam a representação e localização em mapa de qualquer elemento da superfície da Terra.

Segundo VASCONCELLOS (2004), existem três superfícies de referência que são rotineiramente utilizadas para o posicionamento sobre a superfície da Terra (geoposicionamento), a saber:

- a) superfície física - limitante do relevo topográfico;
- b) superfície elipsoidal - delimitada por um elipsóide de revolução, figura matemática gerada pela rotação de uma elipse em torno de seu eixo menor;
- c) superfície geoidal - chamada de geóide, definida como a superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra, que coincide com o nível médio não perturbado dos mares e que se prolonga por sob os continentes, de modo que a vertical lhe é sempre perpendicular.

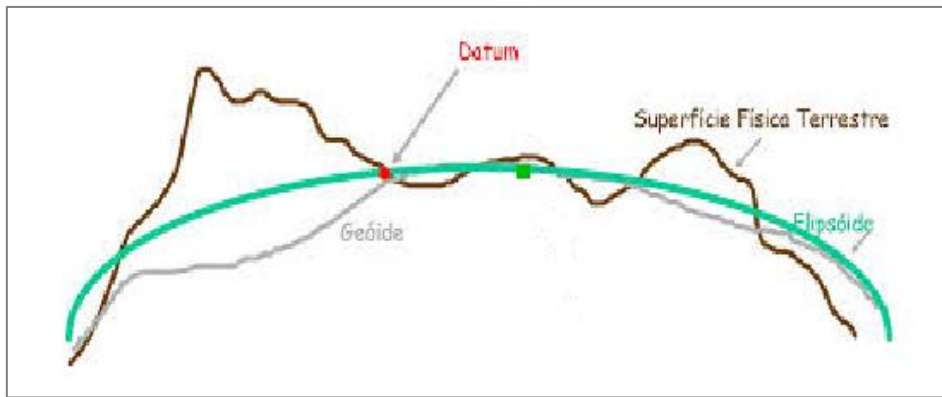


Figura 2.2 - Superfícies de referências para o geoposicionamento

### 2.4.1. Posição e Orientação do Elipsóide de Referência

A posição e a orientação do elipsóide adotado como referência pode ser um ponto calculado computacionalmente em relação ao centro de massa da Terra para uma dada época. Geralmente, esses elipsóides são chamados de geocêntricos. Existem, também, outros elipsóides chamados topocêntricos, cujo propósito não é representar a Terra como um todo e sim se ajustar a uma determinada região geográfica.

No caso do Brasil, legalmente, existem o SAD69, que é topocêntrico, e o SIRGAS2000 (sistema de referência geocêntrico para as Américas), que é geocêntrico. Há, também, outros sistemas que, apesar de não terem respaldo em lei, ainda são utilizados no país.

A forma e tamanho de um elipsóide, bem como sua posição relativa ao geoide, define um sistema geodésico, designado por *datum* geodésico. No caso brasileiro, adota-se o sistema de referência geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS2000), que utiliza o elipsóide de referência GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*).

No período do mapeamento sistemático, até 1979, o IBGE adotava o *datum* planimétrico Córrego Alegre, que utiliza o elipsóide de *Hayford* de 1924. Posteriormente, passou a ser empregado, como referência, o *datum* SAD69, que adota o elipsóide de referência de 1967.

Todavia existe a dificuldade de compatibilizar as informações geográficas de várias origens. Para a análise do impacto ambiental da construção de uma hidrelétrica, por exemplo, várias informações sobre o ecossistema da região precisam ser avaliadas, como a fauna, flora, rodovias, rios, entre outras. Todas essas características devem ser

reunidas para construir um sistema de informações geográficas, e, para que isso seja feito sem erros, elas deverão estar num mesmo sistema de referência.

Os dados fornecidos pelo SAD69 e pelo SIRGAS2000 não são compatíveis entre si, ou seja, não podem ser inseridos num mesmo mapa. Há um deslocamento espacial entre as coordenadas determinadas pelos dois sistemas. A diferença média para o mesmo ponto em SAD69 e SIRGAS2000 é algo em torno de 65 metros. Já na relação entre SIRGAS2000 e WGS84, não existem parâmetros de transformação, porque eles são praticamente idênticos. É relevante ressaltar que os parâmetros de transformação entre SAD69, WGS84 e SIRGAS2000 foram apresentados oficialmente pelo IBGE.

Enquanto o elipsóide de revolução define a forma da Terra, sendo a figura matemática que mais se assemelha ao geóide, o sistema de referência terrestre posiciona e orienta o elipsóide no espaço.

## **2.5. Sistema de Projeção e Escala**

A confecção de uma carta ou mapa exige, antes de tudo, o estabelecimento de um método de forma que cada ponto da superfície terrestre corresponda a um ponto da carta ou mapa e vice-versa.

As projeções cartográficas possuem o problema básico de representação de uma superfície curva em um plano, isto é, representar a forma matemática da Terra, concebida mediante a aproximação por um elipsóide, que é considerada a superfície de referência à qual estão relacionados todos os elementos que se deseja representar em um plano.

Todas as representações de superfícies curvas em um plano envolvem extensões ou reduções que resultarão em distorções. É inviável, por meio de uma projeção cartográfica, atender completamente a todas as condições desejáveis de preservação das relações espaciais entre os objetos. O conhecimento sobre a aplicação das projeções cartográficas torna-se relevante, uma vez que, no ambiente computacional, ela pode ser facilmente alterada ou escolhida de maneira adequada, por exemplo, para o cálculo de áreas, comprimentos, distâncias ou quaisquer outras características físicas fundamentais nas análises espaciais.

Sendo assim, a construção de um sistema de projeção será escolhida de maneira que a carta ou mapa venha a possuir propriedades que satisfaçam às finalidades impostas pela sua utilização. As projeções cartográficas visam atender à construção de um produto cartográfico que reúna uma das seguintes características: de conformidade, equivalência e equidistância.

A projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) é uma das mais populares em todo o mundo. É utilizada entre as latitudes 84° N e 80° S, englobando, assim, o território brasileiro.

Nessa projeção, o mundo é dividido em 60 fusos, cada um deles com 6° de longitude. Cada fuso é originado a partir de uma rotação de cilindro, de forma que o meridiano divide o fuso em duas partes iguais de 3° de amplitude. O sistema baseia-se em uma projeção cilíndrica transversa. O quadriculado dessa projeção está associado ao sistema de coordenadas plano-retangulares, tal que um eixo coincide com a projeção do meridiano central do fuso e o outro com a linha do Equador.

A escala é a relação entre as dimensões dos elementos representados em uma carta ou mapa e a verdadeira grandeza correspondente, medida sobre a superfície topográfica da Terra. A escala é uma informação obrigatória para qualquer mapa e, usualmente, está representada de forma numérica e gráfica. As escalas numéricas ou fracionadas são descritas por frações cujos denominadores representam as dimensões naturais, enquanto os numeradores identificam as dimensões que lhes correspondem no mapa.

É fundamental o conhecimento da escala final de todo documento cartográfico a ser produzido, uma vez que ela influenciará diretamente no erro da posição de cada feição.

## **2.6. Levantamentos**

Segundo o IBGE (1997), levantamento é o conjunto de operações destinado à execução de medições para a determinação da forma e das dimensões do planeta, os quais permitirão o controle horizontal e vertical através da determinação de coordenadas planimétricas e altimétricas.

Dentre os diversos levantamentos necessários à descrição da superfície terrestre em suas múltiplas características, pode-se destacar o levantamento geodésico com uso da tecnologia da geodésia por satélites, como, por exemplo, o sistema global de posicionamento (GPS).

### **2.6.1. Levantamentos Geodésicos**

Os levantamentos geodésicos compreendem o conjunto de atividades dirigidas para as medições e observações que se destinam à determinação da forma e das dimensões do nosso planeta (geóide e elipsóide). É a base para o estabelecimento do referencial físico e geométrico necessário ao posicionamento dos elementos que compõem a paisagem territorial (IBGE, 1997).

### **2.7. GPS (*Global Positioning System*)**

Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, no final da década de 1970, para ser o sistema de navegação das forças armadas; contudo, devido ao nível de precisão alcançado, surgiram usuários civis em diversos campos, tais como, navegação civil, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, entre outros.

O sistema GPS é composto por no mínimo 24 satélites artificiais com órbitas quase circulares que emitem sinais de rádio, garantindo pelo menos 4 satélites acima do horizonte, em qualquer hora do dia e sob quaisquer condições atmosféricas, proporcionando o posicionamento 3D e ainda a correção de erros inerentes aos relógios dos satélites. Os sinais são modulados, em fase, por ondas portadoras da banda L de rádio frequência (MOREIRA, 2010).

Uma importante vantagem do posicionamento por GPS é não necessitar de visibilidade entre as estações terrestres; essa visibilidade deve existir somente entre o receptor e os satélites em órbita que se encontram acima do horizonte num determinado instante.

### **2.8. Altitudes Ortométricas**

As altitudes que têm como referencial o geóide são chamadas de ortométricas (H), sendo definidas pela distância de um ponto ao longo da vertical entre a superfície física e sua projeção na superfície geoidal.

Com o uso cada vez maior do GPS para obtenção das altitudes em regiões na qual o geóide é conhecido, obtém-se, através do seu posicionamento, a altitude geométrica ( $h$ ), que é a distância de um ponto ao longo da normal ao elipsóide entre a superfície física e a sua projeção na superfície elipsoidal. A partir de um sistema de interpolação da ondulação geoidal ( $N$ ), que é a separação entre as duas superfícies de referência (geóide e o elipsóide), é possível estabelecer a altitude ortométricas ( $H$ ) de um ponto ou conjunto de pontos (Figura 2.3).

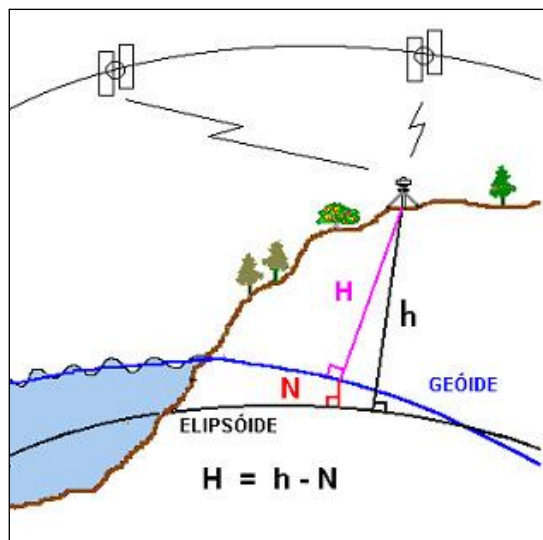


Figura 2.3 - Altitudes ortométrica ( $H$ ), geométrica ( $h$ ) e da ondulação geoidal ( $N$ )  
 Fonte: IBGE (2014)

### **2.9. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**

Em várias partes do mundo, as cartas topográficas são limitadas, desatualizadas, ou simplesmente inexistentes. Esse fato é caracterizado em áreas montanhosas, desérticas ou em regiões com florestas densas, não havendo cobertura topográfica devido à dificuldade de acesso a esses locais. Outro fator limitante para estudos de extensões regionais ou globais é a falta de padronização, visto que cada país gera dados topográficos por métodos distintos. Diante dessa constatação, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), em parceria com as agências espaciais da Alemanha DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) e Itália ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*), realizaram a missão espacial denominada SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com o objetivo de obter dados de elevação por radar em uma escala quase global, a fim de gerar um modelo topográfico digital de alta resolução da Terra.

Em fevereiro de 2000, foi realizada, durante 10 dias a missão a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, mapeando cerca de 80% da superfície continental da Terra (compreendida entre as latitudes 60°N e 56°S), com a técnica de interferometria do radar imageador de abertura sintética (InSAR), na qual a altitude de um ponto na superfície terrestre é determinada a partir da diferença de fase entre reflexões de um mesmo sinal de radar captado por dois receptores distantes um do outro (NASA, 2014).

Segundo PARADELLA *et al.* (2005), um radar imageador é um sensor de radiofrequência que permite derivar informações sobre características físicas (geometria, forma) e elétricas dos alvos. A capacidade de prover imagens de elevada resolução espacial, de modo independente de condições atmosféricas e fonte solar, é particularmente importante para regiões como a Amazônia, onde a presença de chuvas, nuvens e fumaça impõem restrições ao uso de sensores ópticos.

Segundo NASA (2014), durante os dias de operação, a SRTM adquiriu dados suficientes para criar um banco de dados global de alta resolução da topografia da Terra. Os dados brutos foram processados pela NASA e, apesar de obtidos com resolução espacial de aproximadamente 30 metros (comprimento equivalente a um 1 arco de 1" no Equador), estão disponíveis, com esse nível de detalhe, apenas para a área dos Estados Unidos. Para os demais países, houve uma reamostragem dos dados para 90 metros de resolução.

O produto utiliza o *datum* WGS84 em coordenadas geográficas e pode ser obtido gratuitamente em: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/>. O site oficial da SRTM é: [www2.jpl.nasa.gov/srtm](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm). Os dados para o Brasil estão disponíveis segundo a articulação das folhas topográficas em escala 1:250.000.

Algumas aplicações cartográficas desse sistema mostram a sua importância em várias áreas do conhecimento, através de pesquisa e análise de trabalhos que se utilizaram dessa ferramenta, fato que tornam perceptíveis as inúmeras aplicações dos dados obtidos pela SRTM, seja na geomorfologia, sensoriamento remoto, agricultura, drenagem, linhas de transmissão de energia, geração de modelos digitais de superfície e delimitação de curvas de nível.

É notável que os dados gerados pela SRTM podem suprir várias necessidades não só da América do Norte, mas de todas as regiões do planeta que necessitam de seus



produtos. Podem ser aplicados nas diversas áreas da ciência, e o crescente uso desses dados deve-se à sua facilidade de obtenção e manutenção, tornando fácil e viável a geração de diversos produtos. Por outro lado, é imprescindível estar atento aos erros inerentes ao sistema e à precisão requerida.

Por fim, é fundamental levar em conta que o resultado das técnicas empregadas na SRTM é a geração do modelo digital de superfície (MDS), pois os sinais de radar são refletidos pelo dossel das árvores em áreas densamente florestadas e não pelo terreno subjacente. Um modelo digital de terreno (MDT) é produzido a partir de valores de altitude do nível do solo, obtidos, por exemplo, em mapas topográficos (curvas de nível) e levantamentos por GPS.

### **CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - FOTOGRAMETRIA**

A Fotogrametria é a ciência que permite executar medições precisas utilizando fotografias métricas. Embora apresente uma série de aplicações nos mais diferentes campos e ramos da ciência, como na topografia, astronomia, medicina, meteorologia e tantos outros, tem sua maior aplicação no mapeamento topográfico (IBGE, 1997).

A Fotogrametria pode ser, sob o ponto de vista histórico, segmentada em quatro fases: pioneira (1840-1900), analógica (1901-1950), analítica (1951-1990) e digital (1990 - dias de hoje). Mais recentemente, imagens digitais passam a ser utilizadas como dado de entrada para reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, tomando-se, como ponto de partida, imagens bidimensionais, denominadas espaço-imagem (BRITO e COELHO, 2007).

Com o advento da aviação, desenvolveram-se câmaras especiais para a fotografia aérea, substituindo quase que inteiramente a fotogrametria terrestre, a qual ficou restrita apenas a algumas regiões. Quando são utilizadas fotografias aéreas, tem-se a aerofotogrametria (IBGE, 1997).

Na fotogrametria digital, a imagem pode ser adquirida diretamente da câmara digital, ou mesmo através de digitalização matricial de uma imagem analógica, submetendo-a a um *scanner*. Seu objetivo principal é a reconstrução automática do espaço tridimensional (espaço-objeto) a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem). A fotogrametria digital preocupa-se em automatizar a fotogrametria, sobretudo levando-se em conta que os atuais equipamentos de informática possibilitam o rápido processamento de grande quantidade de dados que surge em consequência desses processos (BRITO e COELHO, 2007).

O uso das técnicas fotogramétricas vem sendo potencializado devido à grande necessidade de um planejamento rigoroso, em consonância com as exigências dos novos tempos. O conhecimento é inerente ao planejamento, e, por essa razão, existe a necessidade de avançar de forma rigorosa no entendimento das especificidades das regiões, visando a adoção efetiva dos mais modernos procedimentos de planejamento e desenvolvimento. Através da fotogrametria, é possível extrair elementos geográficos específicos para diversas aplicações.

A Fotogrametria concentra-se em processar imagens, seja em formato digital ou analógico, para obter produtos derivados como modelos digitais de superfície (MDS), permitindo gerar imagens retificadas, modelagem 3D para animação ou visualização, além da interpretação de feições naturais e artificiais para aplicações espaciais ou temáticas.

O processamento fotogramétrico de imagens digitais é tratado em estações fotogramétricas digitais, tendo a extração de informação de imagens digitais baseada em métodos automáticos, como, por exemplo, a correlação de imagens para a determinação de pares de pontos homólogos.

### **3.1. Câmaras Fotogramétricas**

A finalidade das câmaras fotogramétricas é prover imagens fotográficas com estabilidade geométrica. Essa característica é que torna possível o processo de calibração, ou seja, a determinação dos parâmetros geométricos que participam do modelo matemático que relaciona dimensões do objeto fotografado com a sua imagem fotográfica (ANDRADE, 1998). Em outras palavras, significa que, através das câmaras fotogramétricas, é possível e confiável obter medidas precisas em uma fotografia e, por meio da escala utilizada, encontrar a medida real da imagem no terreno.

Geralmente, as câmaras são empregadas em aeronaves, mas podem ser empregadas em plataformas terrestres para uso em fotogrametria arquitetônica. Normalmente, é dada uma importância maior para as câmaras aéreas, pois são as mais utilizadas em mapeamento fotogramétrico por aerolevantamentos.

Mais recentemente, com a chegada dos sensores orbitais de alta resolução, (resolução espacial menor ou igual a 1 metro), existe a possibilidade de obter os pares estereoscópicos para se extrair informações 3D a partir de imagens 2D, caracterizando a fotogrametria em nível orbital.

Segundo BRITO e COELHO (2007), toda câmara fotogramétrica vem acompanhada de um certificado de calibração, que é um documento que atesta os valores precisos de determinados parâmetros fundamentais da câmara como: tipo de câmara, lentes, distância focal e ângulo de abertura. Esses parâmetros serão devidamente utilizados nos processos fotogramétricos posteriores. Um exemplo de certificado encontra-se no Anexo A.

### 3.2. Imagens Fotográficas Aéreas

As imagens podem ser obtidas diretamente no formato digital a partir de câmaras fotogramétricas digitais ou por câmaras de filme, sendo transformadas para o meio digital em mesas digitalizadoras matriciais ou em *scanners*, nessa hipótese, métricos.

Existem duas extensões de dados geográficos: vetorial e matricial (*raster*). A estrutura vetorial é caracterizada pela delimitação de objetos pelas entidades que os determinam (pontos, linhas e polígonos). Já a estrutura matricial é uma matriz composta por píxeis (*picture elements*), que são células quadradas. Dentro das células, há somente um nível de cinza ou coloração que é definida por um número digital (BRITO e COELHO, 2007).

Uma imagem fotográfica aérea proveniente da câmara de filme é quadrada e, normalmente, tem as dimensões de 23x23cm. Possui informações que são registradas no negativo no momento de sua exposição e variam de acordo com o fabricante da câmara. Seus elementos principais são: distância focal da câmara ( $f$ ), altura relativa do vôo ( $H$ ) e as coordenadas do centro de perspectiva (CP). Além desses elementos, encontram-se as marcas fiduciais (Figura 3.1), com suas posições e quantidades variando de acordo com a câmara utilizada. O encontro entre duas linhas opostas que unem essas marcas caracteriza o centro ótico ou ponto principal e o eixo geométrico da imagem fotográfica, onde o eixo “ $x$ ” é a linha de voo, e o eixo “ $y$ ” é perpendicular à linha de vôo.

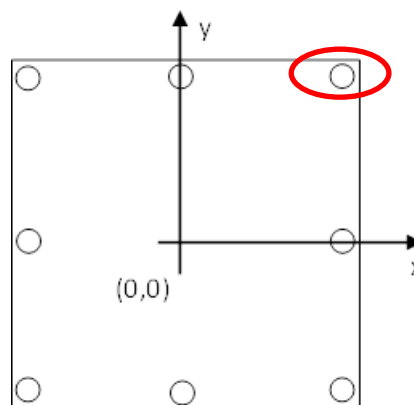


Figura 3.1 - Sistema de coordenadas das marcas fiduciais

A utilização dessas imagens para medições com a finalidade cartográfica depende de todo um processo de orientação, correção e referenciamento, desde sua

aquisição até sua execução nos produtos finais. Todo esse procedimento é chamado de processo fotogramétrico.

### **3.3. Estereoscopia**

A visão monocular permite examinar, em um único plano, a posição e a direção dos objetos dentro do campo da visão humana, além de possibilitar o reconhecimento dos objetos, sua forma, cores e o tamanho. A fotografia simples é uma reprodução da visão monocular. Já a visão binocular permite a percepção de profundidade no intervalo correspondente à distância interpupilar do observador (+/- 7 cm).

As fotografias aéreas são tomadas de tal maneira que um mesmo objeto aparece em duas fotografias sucessivas de diferentes ângulos de tomada. Assim sendo, dentro de uma mesma região, existem duas imagens de pontos de vistas diferentes, causando a sensação de três dimensões.

Cada posição do avião ao fotografar o terreno corresponderá a cada um dos olhos e permitirá a visão estereoscópica, isto é, a visão da superfície do relevo fotografado. Um conjunto de duas fotografias consecutivas com essas características é chamado de par estereoscópico ou estéreopar. Dessa forma, a imagem tridimensional de uma parte do terreno obtida por estereoscopia, a partir da sobreposição parcial das duas fotografias consecutivas, é chamada de modelo estereoscópico.

#### **3.3.1. Paralaxe**

Sobre uma simples fotografia, podem ser determinadas as coordenadas de terreno de um ponto desde que seja conhecida a sua elevação. Essa restrição pode ser superada fazendo medições em estéreopares usando o princípio da paralaxe. O termo paralaxe refere-se a aparente mudança na posição relativa de objetos considerados fixos causados pela mudança do ponto de vista (BRITO e COELHO, 2007).

Esse fenômeno acontece quando se observa um objeto através de uma janela de um veículo em movimento. Tendo a janela como uma moldura de referência, objetos como montanhas a grande distância da janela parecem mover muito pouco dentro da moldura de referência. Em contraste, objetos perto da janela, como árvores à margem da estrada, parecem se mover em relação os objetos mais distantes.

Um exemplo de paralaxe pode ser obtido quando uma câmara aérea que está acoplada ao avião em movimento, obtém uma cena e segundos depois volta a obtê-la em posição diferente. Haverá deslocamentos das posições das imagens de uma foto para a outra e estes serão diretamente proporcionais à altura do terreno.

Portanto, o conhecimento da paralaxe é fundamental para o mapeamento fotogramétrico, uma vez que é por intermédio desse conceito que a fotogrametria cumprirá seu papel de reconstruir o espaço-objeto como, por exemplo, o relevo do terreno a partir da sua visualização estereoscópica e de imagens fotográficas (espaço-imagem) do terreno ou objeto de interesse. A restituição fotogramétrica depende de medições estereoscópicas efetuadas sobre os fotogramas que compõem um estereograma ou modelo estereoscópico.

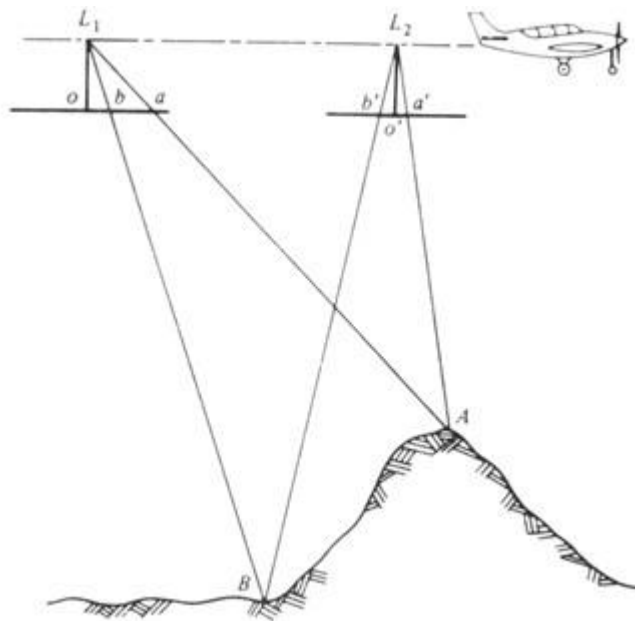


Figura 3.2 - Deslocamento devido à paralaxe

Fonte: Slide Player; <http://slideplayer.com.br/slide/1863812/>  
(acessado em 18/01/2014)

De acordo com a Figura 3.2, a posição relativa das imagens dos pontos A e B mudam em função da alteração do ponto de vista. Além disso, o deslocamento devido à paralaxe ocorre somente paralelo à linha de vôo.

Esses deslocamentos nas imagens apresentam-se paralelos à linha de vôo e são conhecidos como paralaxe estereoscópica. O sentido positivo na medida das paralaxes

de um ponto coincide com o sentido positivo das coordenadas cartesianas deste ponto (ALVES 1999).

Entretanto, ocorrem mudanças na orientação da aeronave durante o vôo. A linha de vôo pode ser determinada localizando-se, na primeira fotografia, seu centro perspectivo e os centros perspectivos das duas imagens adjacentes. Esses pontos são chamados pontos principais conjugados. Uma linha entre os pontos principais conjugados define a linha de vôo. Como mostra a Figura 3.3, todas as fotografias, exceto as que se encontram no final da faixa do vôo, normalmente têm duas direções de eixo. Esse fato ocorre porque a direção da aeronave entre as exposições é normalmente curva. Na Figura 3.3, o eixo de vôo para o estereopar formado pelas fotos 1 e 2 é o eixo de vôo 12. O eixo de vôo para o estereopar formado pelas fotos 2 e 3 é o eixo de vôo 23.

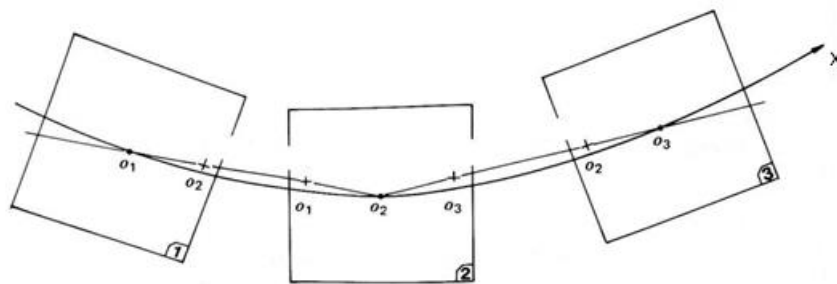


Figura 3.3 - Determinação da linha de vôo

A linha de vôo para qualquer estereopar define o eixo  $x$  de coordenadas na foto para uso nas medidas de paralaxe. Linhas perpendiculares à linha de vôo  $x$  passam através do ponto principal de cada foto formando na fotografia o eixo  $y$  para medida de paralaxe.

A paralaxe do ponto A, na Figura 3.2, é expressa em termos do sistema de coordenadas da linha de vôo, como mostra a Equação 3.1 dada por:

$$p_a = x_a - x'_a \quad (3.1)$$

onde:

$p_a$  é a paralaxe absoluta do ponto A;

$x_a$  é a medida da coordenada  $x$  da imagem  $a$ , na fotografia da esquerda do estereopar;

$x_a'$  é a coordenada x da imagem  $a'$  na fotografia da direita do estereopar.

Na Figura 3.2, os pontos A e B foram projetados em a e b, na foto da esquerda, e em a' e b' na foto da direita. Como o ponto A tem maior altitude, sua paralaxe é maior que a do ponto B, pois o ponto A está mais próximo à câmara. Quanto maior a paralaxe, maior a altitude do ponto; dois pontos de mesma altitude possuem, evidentemente, a mesma paralaxe. Essas propriedades das paralaxes permitem o cálculo de elevações e mesmo das coordenadas planimétricas.

A diferença de paralaxe entre dois pontos quaisquer (a e b) será dada por:

$$\Delta p_x = px_a - px_b \quad (3.2)$$

Analogamente à paralaxe sobre o eixo x, ocorre a paralaxe sobre o eixo y. A paralaxe em y é resultante de variações na altura de vôo entre as fotos do estereograma, de distorções geométricas e uma orientação imprópria do mesmo. Observa-se que a paralaxe em y pode e deve ser eliminada. A diferença de paralaxe num estereograma entre dois pontos da imagem está diretamente relacionada à diferença de altura entre esses dois pontos no terreno, segundo a Equação 3.3 expressa por

$$\Delta h = \frac{H}{p_a + \Delta p_x} \cdot \Delta p_x \quad (3.3)$$

onde

$$\Delta p_x = p_a - p_b \quad (3.4)$$

$$p_a = x_a - x'_a \quad (3.5)$$



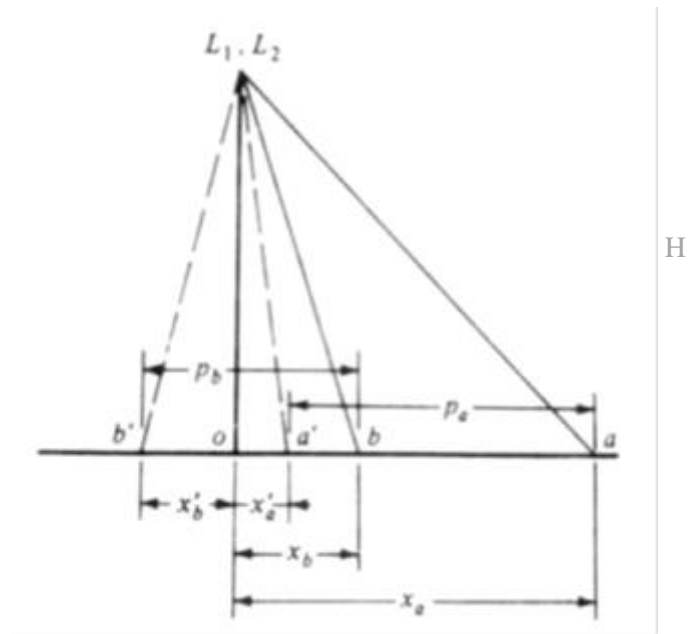


Figura 3.4 - Medição de paralaxe estereoscópica  
 Fonte: Slide Player; <http://slideplayer.com.br/slide/1863812/>  
 (acessado em 18/01/2014)

### 3.4. Processo Fotogramétrico

#### 3.4.1. Orientação Interior

Na fotogrametria digital a orientação interior não é mais feita sobre dia filmes utilizados nas gerações anteriores da Fotogrametria (AUGUSTO, 1999). A recuperação do feixe perspectivo é normalmente realizada através de uma transformação matemática (afim, ortogonal, ou isogonal) entre os sistemas de coordenadas das marcas fiduciais (mm) e digital (píxel) (ANDRADE, 1998), como pode ser visto na Figura 3.5.

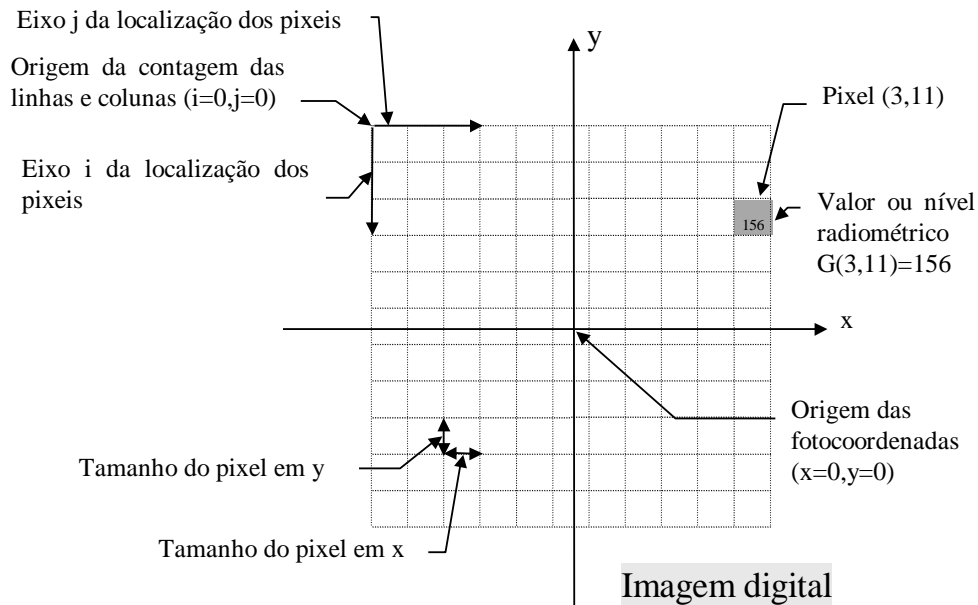


Figura 3.5 - Sistema de coordenadas em píxel

Os pontos utilizados no cálculo dos parâmetros da transformação são as marcas fiduciais em milímetros presentes no certificado de calibração da câmara. Na imagem digital, as coordenadas em píxel podem ser medidas manual ou automaticamente.

A orientação interior vai permitir a conversão das coordenadas do sistema digital (píxel) para o sistema das marcas fiduciais (milímetros), através de um modelo matemático utilizado para esse fim, que é a transformação afim, geralmente associada a um ajustamento de observações pelo modelo paramétrico e pelo método dos mínimos quadrados.

### 3.4.2. Orientação Exterior

Segundo AUGUSTO (1999), na fotogrametria digital, as relações entre as coordenadas no sistema imagem (fotografia) e as coordenadas no sistema objeto (terreno) são calculadas sem a introdução das coordenadas de modelo como passo intermediário, o que permite o cálculo simultâneo das orientações relativa e absoluta.

Para determinar os seis parâmetros da orientação exterior, incluindo as coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) e os ângulos de rotação ou atitude do sensor ( $\omega, \phi, \kappa$ ) de uma fotografia aérea, utiliza-se a solução da resseção espacial.

$X_0, Y_0$  e  $Z_0$ , representam a posição do centro de perspectiva nos eixos X, Y e Z. Já  $\omega$  representa a rotação do eixo x em relação a X, enquanto  $\phi$  representa a rotação do

eixo y em relação a Y. Por fim,  $\kappa$  representa a rotação do eixo z em relação a Z. Os três ângulos são contados no sentido anti-horário (Figura 3.6).

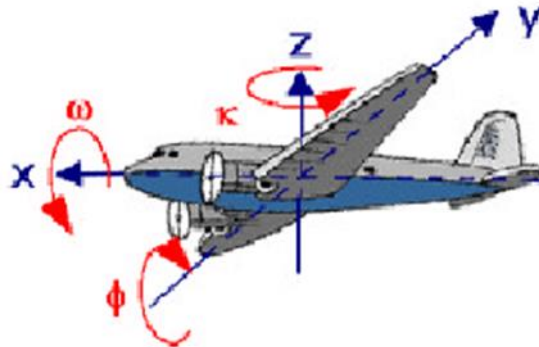


Figura 3.6 - Ângulos de atitude do avião  $\phi$ ,  $\omega$  e  $\kappa$   
 Fonte: adaptado de BRITO e COELHO (2007)

### 3.4.3. Ressecção Espacial

A ressecção espacial em fotogrametria consiste no cálculo dos parâmetros de orientação exterior (posição e atitude) das imagens fotográficas em relação a um referencial, isto é, determinam-se as coordenadas dos centros perspectivos ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) e os ângulos de orientação do sistema fotogramétrico em relação ao referencial de terreno ( $\omega, \phi, \kappa$ ) foto a foto. São necessários pelo menos três pontos de apoio de campo (controle) para cada imagem, supondo-se que os elementos da orientação sejam conhecidos. Entretanto, são utilizadas mais observações (superabundância de dados), objetivando a utilização do método dos mínimos quadrados (MMQ).

Os ângulos da atitude do sensor são inseridos na matriz de rotação R, que relaciona o sistema objeto e imagem (AUGUSTO, 1999).

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cdot \cos \kappa & \cos \phi \cdot \sin \kappa & -\sin \phi \\ \sin \phi \cdot \sin \omega \cdot \cos \kappa - \cos \omega \cdot \sin \kappa & \sin \phi \cdot \sin \omega \cdot \sin \kappa + \cos \omega \cdot \cos \kappa & \cos \phi \cdot \sin \omega \\ \sin \phi \cdot \cos \omega \cdot \cos \kappa & \sin \phi \cdot \cos \omega \cdot \sin \kappa - \sin \omega \cdot \cos \kappa & \cos \phi \cdot \cos \omega \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A solução da ressecção espacial está baseada nas relações matemáticas (Equações 3.7 e 3.8) existentes entre as coordenadas no espaço imagem ( $\xi$  e  $\eta$ ) e as coordenadas no espaço objeto ou terreno (X, Y, Z), que são obtidas pela aplicação da condição de colinearidade.

Equações de Colinearidade:

$$\xi = \xi_0 - c \cdot \frac{R_{11} \cdot (X - X_0) + R_{21} \cdot (Y - Y_0) + R_{31} \cdot (Z - Z_0)}{R_{13} \cdot (X - X_0) + R_{23} \cdot (Y - Y_0) + R_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (3.7)$$

$$\eta = \eta_0 - c \cdot \frac{R_{12} \cdot (X - X_0) + R_{22} \cdot (Y - Y_0) + R_{32} \cdot (Z - Z_0)}{R_{13} \cdot (X - X_0) + R_{23} \cdot (Y - Y_0) + R_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (3.8)$$

#### 3.4.4. Interseção Espacial

A interseção espacial é calculada a partir das coordenadas de pontos no sistema analógico (mm) e não no sistema digital (píxel). Assim sendo, são necessários tanto os parâmetros da transformação afim (orientação interior) quanto os parâmetros da orientação exterior ( $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$ ).

Uma vez determinados os parâmetros da orientação exterior, tem-se, através das equações de colinearidade, estabelecida a relação entre imagem e objeto no terreno. Os parâmetros  $r_{ik}$  são elementos da matriz de rotação espacial, que descreve a atitude do sensor no espaço em relação ao sistema de coordenadas X, Y e Z.

De acordo com BRITO e COELHO (2007), através das equações de colinearidade, a extração das coordenadas X e Y será

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\xi - \xi_0) + r_{13} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\xi - \xi_0) + r_{33} \cdot c} \quad (3.9)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\xi - \xi_0) + r_{23} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\xi - \xi_0) + r_{33} \cdot c} \quad (3.10)$$

fazendo

$$k_{xi} = \frac{r_{11}(\xi - \xi_{0i}) + r_{12}(\xi - \xi_{0i}) + r_{13} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_{0i}) + r_{32}(\xi - \xi_{0i}) + r_{33} \cdot c} \quad (3.11)$$

$$k_{yi} = \frac{r_{21}(\xi - \xi_{0i}) + r_{22}(\xi - \xi_{0i}) + r_{23} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_{0i}) + r_{32}(\xi - \xi_{0i}) + r_{33} \cdot c} \quad (3.12)$$

O índice  $i$  corresponde aos dados da respectiva fotografia.

A partir das coordenadas  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$  do centro perspectivo, dos parâmetros da orientação interior e exterior, relacionados à constante  $k$  de cada fotografia, têm-se quatro equações para três coordenadas desconhecidas de um ponto  $P$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).

A partir das equações anteriores, chega-se

$$Z = \frac{X_{02} - Z_{02}k_{x2} + Z_{01}k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}} \quad (3.13)$$

A Figura 3.7 ilustra o uso da interseção espacial para o cálculo de  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  no terreno.

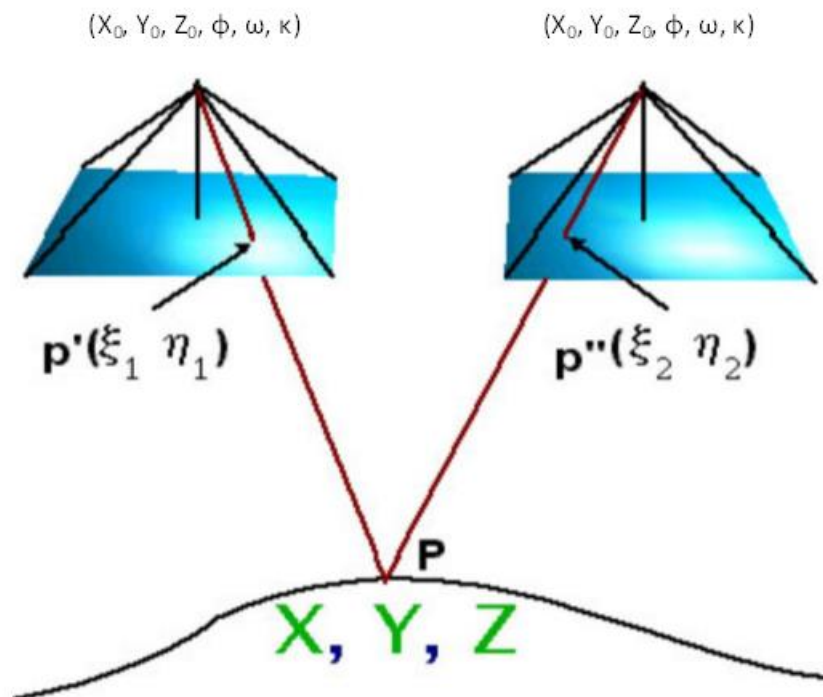


Figura 3.7 - Cálculo da interseção espacial  
Fonte: adaptado de BRITO e COELHO (2007)

### 3.5. Fototriangulação

Segundo BRITO e COELHO (2007), fototriangulação é o processo de se determinar as coordenadas do terreno (ou do espaço-objeto) dos pontos fotogramétricos selecionados sobre as imagens fotográficas (espaço-imagem). A fototriangulação por feixes perspectivos pode ser entendida como a execução de uma ressecção espacial simultaneamente à execução da interseção espacial, para um conjunto de imagens digitais adquiridas sobre determinado trecho do terreno, o que permite a obtenção

simultânea dos seis parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do bloco fotogramétrico.

O método dos feixes perspetivos permite que a fototriangulação seja executada para todas as imagens obtidas com câmaras fotogramétricas aéreas que compõem o espaço imagem e para todos os pontos fotogramétricos contidos nessas imagens em um único processo. Esse procedimento permite a reconstrução ótima da geometria dos feixes de raios luminosos formadores do espaço imagem no momento da aquisição das imagens fotográficas. O processo vale-se do método dos mínimos quadrados (MMQ) para minimizar a função que quantifica o desvio padrão do ajustamento, de forma que cada raio ajustado, originando-se em uma posição qualquer do espaço objeto, passe o mais próximo possível do seu homólogo no espaço imagem e do centro de perspectiva da imagem (SILVEIRA, 2005).

Também conhecido como ajustamento por feixe perspetivo ou *bundle block adjustment*, o método caracteriza-se pelo fato de a unidade elementar para o ajustamento ser um raio projetado, e todas as imagens fotográficas que compõem o espaço imagem terem suas coordenadas do centro de perspectiva (CP) e ângulos de atitude ajustados de forma conjunta e simultânea. A Figura 3.8 mostra um bloco de imagens e seus respectivos feixes perspetivos.

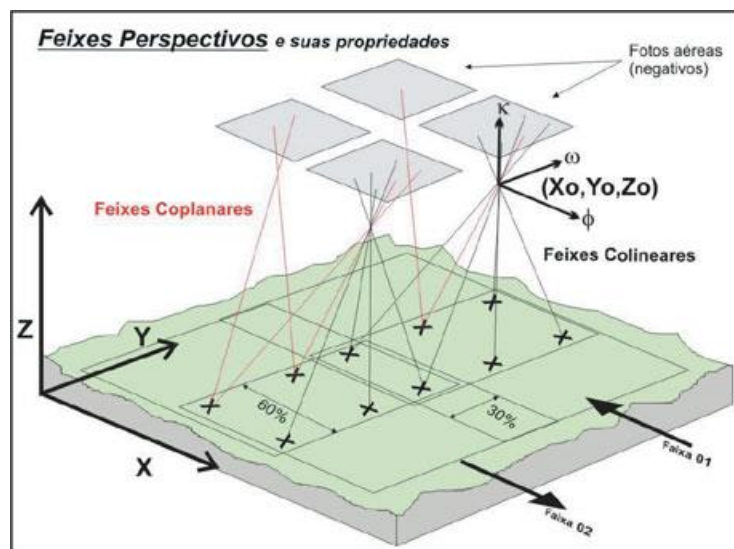


Figura 3.8 - Bloco de 4 imagens fotográficas e seus feixes perspetivos

Fonte: MUNDOGEO (2014)

## CAPÍTULO 4 - MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS)

Neste Capítulo, será desenvolvida a revisão bibliográfica desta dissertação apoiada nos conceitos cartográficos (Capítulo 2) e fotogramétricos (Capítulo 3).

A representação matemática contínua da distribuição espacial das variações de altitude do terreno ou relevo é uma componente fundamental no processo cartográfico que, via computador, recebe o nome de modelo digital de terreno (MDT). É representado por um conjunto de dados que explicitam as coordenadas (X, Y, Z) do terreno (PETRIE e KENNIE, 1990; ACKERMANN, 1996; ANDRADE, 1998; BARBOSA e SILVA, 2000; NASER *et al.*, 2005).

Em outros termos, o MDT consiste em, conhecidos um conjunto finito de pontos discretizadores sobre o contínuo do terreno em termos de coordenadas X, Y, Z (sendo Z uma função de X e de Y), tratar numericamente todas as informações referentes à superfície (da qual fazem parte os pontos de amostragem) através de modelos computacionais, já amplamente difundidos em programas computacionais, formando uma modelagem tridimensional (BALDISSERA e OLIVEIRA, 2002).

MILLER e LAFLAMME (1958) introduziram o conceito do modelo digital de terreno como uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de pontos selecionados com coordenadas conhecidas X, Y e Z em um campo arbitrário de coordenadas.

Segundo SIMÕES (1993), o MDT é a representação de superfícies físicas ou artificialmente criadas através de processos matemáticos, ou seja, através da modelagem, procura-se determinar a superfície que melhor representa um conjunto de dados pontuais, em geral por ajuste de funções ou por interpolações.

Existe uma variedade de termos para designar modelos digitais que representam a superfície terrestre, sua topografia ou vários tipos de atributos, cuja representação no espaço necessita de uma forma de expressão contínua como a temperatura, pressão, declividade e altitude. Nesse caso, é importante fazer a definição dos termos que serão adotados nesta dissertação. O termo modelo digital de superfície (MDS) representa a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela. É extraído o que é visível nas imagens ópticas. Logo, existindo árvores e construções, a superfície

representada será o seu topo. Já o MDT representa a superfície real do terreno, ou seja, as feições que estão diretamente acima do solo.

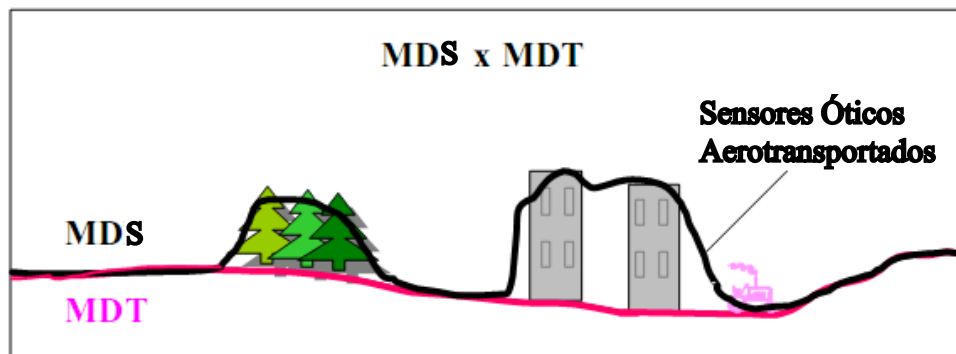


Figura 4.1- Diferença entre MDS e MDT  
Fonte: adaptado de ROSÁRIO (2013)

Nesta dissertação, será utilizado o termo MDS, pois serão utilizadas informações de sensores óticos aerotransportados. Encontram-se diversos sinônimos para a abreviação de MDS, sendo que os mais comuns são: modelo numérico de elevação (MNE) e modelo digital de elevação (MDE).

O MDS é o principal componente de um MDT e um subconjunto do mesmo (LI *et al.*, 2005). No entanto, MDS é mais aplicável a modelos hidrológicos, uma vez que atributos hidrológicos podem ser derivados da altimetria.

A partir dos dados gerados pelo MDS, pode-se produzir um vasto conjunto de informações imprescindíveis e de interesses para futuros estudos ambientais. Já que o seu uso possibilita a extração de dados de declividade e, por conseguinte, das direções preferenciais do fluxo superficial, torna-se possível estimar o tempo de viagem do fluxo de água de um ponto da bacia até o seu exutório. O MDS permite ainda o mapeamento de áreas atingidas por uma inundação, revelando a extensão do evento e, principalmente, auxiliando no trabalho de assistência às vítimas. Contudo, para que essas informações tenham relevância e efetivamente possam prevenir acidentes e salvar vidas, é fundamental o conhecimento dos erros associados, bem como a precisão dos dados processados na aquisição desse produto cartográfico.

Os primeiros modelos de terreno, segundo LI *et al.* (2005), eram modelos físicos feitos de borracha, barro ou de areia. Na Segunda Guerra Mundial, muitos modelos foram feitos pela Marinha Americana e reproduzidos em borracha. Já na guerra das Malvinas, em 1982, as forças britânicas utilizaram modelos de areia e barro para



planejar suas ações. A introdução de técnicas matemáticas, numéricas e digitais para modelagem do terreno teve início na década de 50, quando a fotogrametria começou a ser usada amplamente para aquisição de dados para projetos de estradas. Hoje, é amplamente usado por diversas áreas, entre elas, a engenharia cartográfica, civil, elétrica e a arquitetura.

O uso de modelos digitais de superfície em hidrologia vem se intensificando desde os anos 80 do século XX. Alguns estudos têm sido desenvolvidos e adaptados a modelos hidrológicos e utilizados para estimativa de vazão fluvial. Os resultados têm sido favoráveis ao desenvolvimento de novas pesquisas nessa área.

JENSEN e DOMINGUE (1988) apresentaram um método para o levantamento de atributos topográficos de uso hidrológico a partir de modelos digitais de elevação. O método foi aplicado para delimitação e conexão de bacias hidrográficas, mapeamento automático da rede de drenagem e do caminho do escoamento superficial. O programa foi testado em vários estudos hidrológicos, com modelos digitais de superfície construídos a partir de cartas nas escalas 1:250.000 e 1:25.000. Os autores concluíram que o procedimento desenvolvido apresentou até 97 % de confiabilidade se comparado aos métodos convencionais de análise topográfica para hidrologia. BAND (1989) desenvolveu um sistema de informação para bacias hidrográficas, organizado a partir de dados de elevação do terreno. O autor conseguiu extrair a rede de drenagem, as sub-bacias, permitindo dividir as vertentes que drenam para o canal principal da bacia e mapear o caminho do escoamento através da conexão entre bacias a partir do MDS. O estudo revelou que, a partir de um MDS, existe a possibilidade de gerar curvas que relacionam as variações do nível da água ou da vazão em relação ao tempo (cotogramas ou hidrogramas, respectivamente).

Com o crescente uso de modelos digitais de superfície na década de 90 do século passado, diversas questões foram suscitadas sobre sua aplicação. ROMANOWICZ *et al.* (1993) afirmam que alguns modelos de resposta hidrológica de bacias, como o Topmodel, utilizam dados topográficos derivados de MDS para a estimativa de vazão fluvial, definindo o índice topográfico e o seu correspondente histograma para a bacia em estudo. Os trabalhos de ZHANG e MONTGOMERY (1994) e WOLOCK e MCCABE (1995) estudaram a resolução do MDS utilizado para a obtenção da distribuição do referido índice topográfico. Já HOOG *et al.* (1993) obtiveram, através de

análise digital, importantes fatores hidrológicos, como: densidade e gradiente de rios, declividade da superfície, frequência de canais de drenagem e hierarquia fluvial. Concluíram que a análise de MDS apresenta um amplo leque de possibilidades de uso em hidrologia, facilitando também a associação com dados espaciais disponíveis em sistemas de informação geográfica. WALKER e WILGOOSE (1999) descreveram que o modelo digital apresenta boa correlação entre a área de contribuição e a declividade, exibindo os pontos de inflexão que marcam o início da captação fluvial, permitindo que a rede de drenagem possa ser determinada com segurança.

Nos anos 2000, foi intensificada a produção de MDS a partir de informações de sensoriamento remoto, tal como o *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR), que ganharam relevância por serem advindos de uma técnica rápida e acurada de coletar dados topográficos (RABUS *et al.*, 2003). A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), realizada em 2000, é o grande exemplo dessa técnica. Nesse contexto, alguns trabalhos foram desenvolvidos por GERSTENECKER *et al.* (2005), que, avaliando alguns métodos para geração de MDS, inclusive cartas topográficas, concluíram que a SRTM é um passo de importância considerável no detalhamento acurado dos modelos digitais de superfície. Já PINHEIRO (2006) concluiu que, após correções, as altitudes do MDS obtido dos dados SRTM apresentaram melhores resultados na comparação com o MDS gerado de cartas topográficas na escala 1:50.000. Por fim, SOBRINHO *et al.* (2010) analisou uma metodologia para delimitação automática de bacias hidrográficas, utilizando, para tanto, dados do projeto SRTM, integrados e processados em ambiente SIG, validados na bacia hidrográfica do Córrego Guariroba em Campo Grande/MS.

Atualmente, a confecção de MDS por métodos fotogramétricos também vem intensificando-se com o desenvolvimento das técnicas de fotogrametria digital, como foi amplamente apresentado no Capítulo 3. Por essa razão, um dos objetivos desta dissertação é utilizar essas técnicas para a extração de modelos digitais de superfície.

#### **4.1. Aquisição de Dados**

De acordo com BRITO e COELHO (2007), existem várias fontes de dados para obter as altitudes para a elaboração de um MDS. Um dos primeiros métodos adotados era a digitação das coordenadas de pontos obtidos por inspeção na carta ou provenientes

da fototriangulação. Obviamente, como se tratava de uma abordagem pouco prática e altamente passível de erros, não veio a se popularizar.

Outro método apontado por BRITO e COELHO (2007) é a digitalização de cartas em papel através de mesa digitalizadora, percorrendo-se uma curva de nível manualmente com o cursor. Obtêm-se as coordenadas planimétricas dos pontos sobre ela situados. A digitalização das cartas topográficas analógicas também pode ser realizada utilizando-se scanners. As curvas de nível também podem ser extraídas automaticamente de estereomodelos fotogramétricos, embora esse método esteja sujeito a erros (HUTCHINSON e GALLANT, 1999).

SANTOS *et al.* (2001) consideram a digitalização de documentos cartográficos como a técnica de extração de atributos menos precisa existente. Esse fato é devido aos originais de impressão que trazem incorporados em si erros inerentes aos procedimentos operacionais de confecção da folha topográfica no formato analógico.

Atualmente, dois outros métodos têm sido bastante empregados: a aquisição de dados via GPS em método cinemático ou semicinemático, em que o terreno é percorrido com uma antena portátil, conectada a um coletor de feições, onde, ao final, descarregam-se os dados para seu pós-processamento, e a extração fotogramétrica digital, através das fotografias aéreas ou mesmo da fotogrametria orbital, quando medidas fotogramétricas são realizadas nas imagens ópticas com superposição (pares estereoscópicos) obtidas através dos sistemas sensores. Esse último procedimento torna-se o método mais prático por ser executado no gabinete, justificando a ida ao campo apenas para a determinação dos pontos de controle.

HUTCHINSON e GALLANT (1999) citam três fontes de dados de elevação para as quais são aplicáveis as diferentes técnicas de geração de modelos digitais de superfície: pontos cotados, curvas de nível e dados de elevação de sensoriamento remoto aéreo e orbital.

Os pontos cotados que compõem o terreno são uma fonte de dados importante para a maioria das técnicas de interpolação, inclusive métodos de triangulação e métodos de interpolação por krigagem. Esses dados podem ser obtidos através dos levantamentos de campo direto utilizando instrumentos topográficos digitais (estação total, níveis digitais) ou adquiridos por GPS no modo estático.

De acordo com DALMOLIN e SANTOS (2004), os dados para a criação do MDS podem ser obtidos utilizando métodos analógicos para a extração das coordenadas (X, Y, Z) e posterior transferência para o computador, ou fazendo-se uso de técnicas digitais de forma semiautomática ou automática. Atualmente, o laser scanner é cada vez mais usado para a aquisição de um MDS.

É importante registrar que a aquisição de dados deve ser feita de maneira regular, procurando abranger toda a área amostrada e também os pontos representativos da topografia. Observa-se que o processo de aquisição de dados é extremamente importante na obtenção de bons resultados na geração do MDS.

Segundo BRITO e COELHO (2007), os dados podem ser obtidos através das seguintes feições: dispersa, semirregular ou regular, como mostra a Figura 4.2.

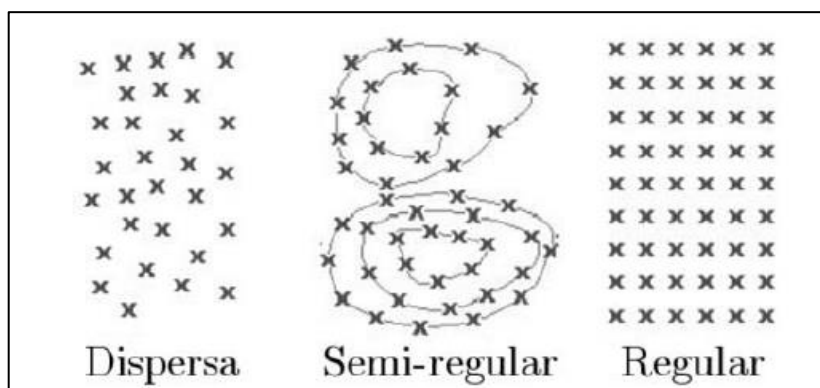


Figura 4.2 - Formas de aquisição do MDS

Fonte: BRITO e COELHO (2007)

A forma dispersa não segue ordem de aquisição, com os pontos sendo adquiridos livremente no espaço. Já a forma semiregular segue algum arranjo mais específico, mas não possui espaçamento constante entre os pontos. A forma regular é aquela em que todos os pontos estão igualmente espaçados em X e Y, e suas altitudes são obtidas em disposição de grade regular. Essa forma pode ser conseguida por meio de métodos de fotogrametria digital.

#### 4.2. Geração do MDS

A geração do MDS por métodos de processamento fotogramétrico digital a partir de pares estereoscópicos tem sido feita em linhas de produção cartográfica. Seguramente o mais prático, pode ser realizado em boa parte dentro de gabinete, sendo

justificável a ida a campo apenas para coleta de pontos de controle e de teste de qualidade.

Nesse contexto, outras técnicas também são utilizadas como a varredura por laser, como o GPS e a digitalização e rotulação de curvas de nível de cartas topográficas impressas em base celulósica. A partir dessa etapa, são interpoladas grades ou malhas de pontos pré-definidos, caracterizando, assim, uma representação digital do relevo da região de interesse. Vale destacar que, na digitalização, a massa de pontos gerada já terá alguma estruturação, pois as curvas de nível possuem uma propriedade importante, que é o fato da altitude ser constante para cada curva.

Segundo FELGUEIRAS (2004), o processo de geração de um MDS pode ser dividido em três etapas: amostragem, modelagem e aplicações. A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse. Já a modelagem envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objetivo de se obter uma representação contínua do fenômeno a partir de amostras. Por último, as aplicações podem ser: análise de variáveis geofísicas e geoquímicas, elaboração de mapas de declividade e geomorfológicos, análises de corte-aterro para projetos de estradas e barragens, armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos.

### **4.3. Métodos de Estruturação do MDS**

Os MDS não são elaborados diretamente sobre os dados amostrados, mas sim a partir dos modelos gerados no formato de grade regular ou irregular. Esses formatos simplificam a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápidos computacionalmente. As grades retangulares são, geralmente, utilizadas em aplicações qualitativas, como, por exemplo, para visualização da superfície, enquanto que o modelo de grade irregular é utilizado quando se quer maior precisão na análise quantitativa dos dados (ZANARDI, 2006).

Segundo FELGUEIRAS (2004), os tipos de modelos digitais de superfície mais utilizados são: os modelos de rede regular retangular e os modelos de rede irregular triangular, comumente denominado TIN (*Triangular Irregular Network*).

### 4.3.1. TIN (*Triangular Irregular Network*) X Grades Regulares

Existem diferenças entre as duas estruturas de dados mais comumente utilizadas em modelagem digital de terreno (Figura 4.3), a saber: as grades regulares, que são geralmente utilizadas em aplicações qualitativas, ou seja, para visualização da superfície, e as redes ou malhas de triangulação irregular, que são utilizadas quando se requer maior precisão na análise quantitativa dos dados.

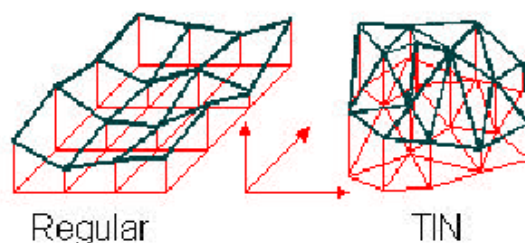


Figura 4.3 - Tipos de grade  
Fonte: BRITO e COELHO (2007)

### 4.3.2. TIN

A modelagem digital pode utilizar malhas regulares e irregulares. No caso de uma rede de triângulos irregulares, a superfície ou objeto de interesse é representado por um conjunto contínuo de faces triangulares gerados a partir de pontos distribuídos irregularmente sobre a superfície (TSAI, 1993).

O uso do TIN apresenta a vantagem de poder descrever a superfície com diferentes níveis de resolução, além de promover a descrição de superfícies complexas com pouco esforço computacional e pequeno tempo de processamento.

Os vértices de cada triângulo são os pontos amostrados da superfície. Essa modelagem, considerando as arestas dos triângulos, permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares, sejam consideradas durante a geração da malha triangular, possibilitando, assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas (FELGUEIRAS e CÂMARA, 2004).

A rede de triangulação irregular é composta pelos pontos originais, ligados três a três, formando triângulos irregulares, mas com propriedades matemáticas bem definidas. O modo como os pontos se ligam é determinado pelo algoritmo chamado

triangulação de Delaunay, que conecta um ponto apenas a seus vizinhos. Ressalta-se que os triângulos são formados tão próximos de triângulos equiláteros quanto possível (BRITO e COELHO, 2007).

#### 4.3.2.1. Triangulação de Delaunay e Polígonos de Voronoi

Segundo WATSON (1994), a relação espacial determinada por um conjunto de círculos vizinhos têm duas representações gráficas em comum: os diagramas de Voronoi e a triangulação de Delaunay (Figura 4.3), sendo essas estruturas duais, ou seja, há dualidade entre elas.

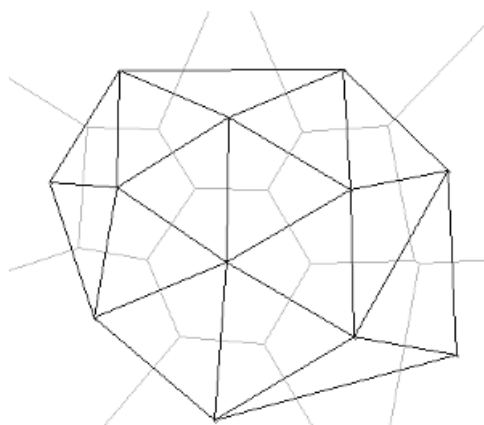


Figura 4.4 - Triangulação de Delaunay e polígonos de Voronoi

Utilizando critérios específicos para construção da rede triangular, pode-se chegar a malhas únicas sobre o mesmo conjunto de amostras. Uma dessas malhas, muito utilizada na prática nos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) atualmente em uso profissional ou científico, é a malha de Delaunay, mais conhecida como triangulação de Delaunay (FELGUEIRAS e CÂMARA, 2001).

A grande vantagem da triangulação de Delaunay está na configuração da rede de triângulos, sendo estes os mais equiláteros possíveis e de comprimento total das arestas mínimo.

Durante a triangulação de Delaunay, o algoritmo inicialmente cria uma circunferência a partir de três pontos iniciais. Através da inserção automática e aleatória dos pontos seguintes, são executados testes para verificação da posição dos mesmos em relação à circunferência inicial. Para cada inserção de um novo ponto, são geradas novas circunferências, chamadas de círculos vizinhos naturais. Os centros desses

círculos, ao fim da execução do algoritmo, definem os vértices dos polígonos de Voronoi.

A construção da rede de triângulos envolve esse processo de verificação, o que resultará na configuração ideal da rede para o conjunto de dados. Nas Figuras 4.4 e 4.5, são apresentados os processos de verificação de configuração de triângulos de Delaunay em função da inserção de pontos internos e externos a circunferência.

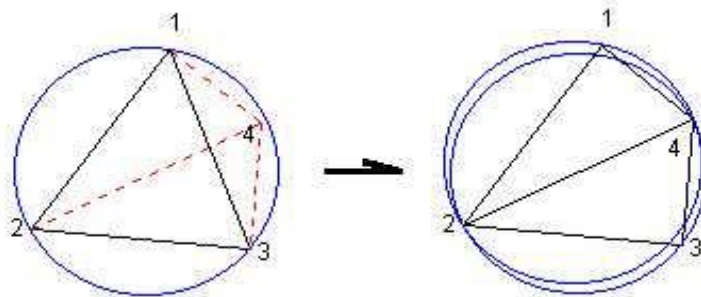


Figura 4.4 - Relação entre um triângulo e um ponto inserido no interior da circunferência passante pelos pontos 1, 2 e 3

Note-se que, com a inserção do ponto 4, a aresta 1-3 foi destruída, sendo criadas três novas arestas, ou seja, 2-4, 1-4 e 4-3.

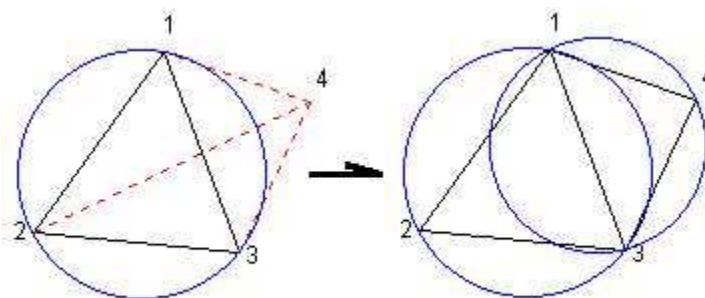


Figura 4.5 - Relação entre um triângulo e um ponto inserido fora da circunferência

No caso do método de análise de vizinhos naturais, aplicado sobre uma base plana, o teste é executado a partir da definição das coordenadas do centro e do valor do raio dos círculos que passam por três pontos. Ao inserir um quarto ponto, a rotina verifica analiticamente se as coordenadas do ponto estão ou não dentro da circunferência e a distância entre ele e pontos adjacentes.



Se o ponto estiver interno à circunferência, o triângulo tem sua aresta próxima ao ponto apagada da lista, e são adicionadas três novas arestas, ligando o ponto inserido aos três vértices do triângulo inicial, conforme é mostrado na Figura 4.4.

No caso do ponto inserido estar externo à circunferência, são criadas duas novas arestas ligando o novo ponto aos seus dois vizinhos mais próximos. Note-se, na Figura 4.5, que, com a inserção do ponto 4 fora da circunferência passante pelos pontos 1-2-3, o algoritmo adicionará apenas duas arestas, ou seja, ligando os pontos 1-4 e 4-3.

Os pontos são inseridos um a um, e o algoritmo aplica esse teste até concluir a triangulação. A partir da lista de triângulos classificados e ordenados, contendo cada vértice da triangulação de Delaunay, são definidos os vizinhos naturais de cada um dos pontos e armazenados em outra lista.

### **4.3.3. Grade Regular**

A grade regular pode ser obtida tanto por aquisição regular quanto por interpolação. Entretanto, como em geral é advinda de interpolação, perde-se a precisão dos pontos originais. A grade regular também não permite a inserção de linhas de quebra (*breaklines*), o que impede que certas feições descontínuas (como rios, estradas, etc.) sejam representadas fielmente (BRITO e COELHO, 2007).

De acordo com CÂMARA e MEDEIROS (1998), os procedimentos de interpolação para geração de grades regulares a partir de amostras variam de acordo com a grandeza medida. No caso de altimetria, é comum o uso de funções de ponderação por inverso do quadrado da distância. Já para variáveis geofísicas, procedimentos de análise espacial, como a krigagem, são empregados.

### **4.3.4. Interpoladores**

Segundo o SURFER (1999), os interpoladores, como o próprio nome sugere, têm por função atribuir valores a novos pontos inseridos num campo de valores já existente. O produto da interpolação gera uma malha contínua, regular ou irregular, com valores interpolados nas novas posições criadas pela malha.

BURROUGH (1998) afirma que a interpolação é o procedimento de predizer valores de atributos em locais sem amostras medidas. A predição do valor de um atributo em locais fora da área de cobertura de observações existentes denomina-se

extrapolação. A interpolação é usada para converter dados de observações pontuais para campos contínuos de forma que os padrões espaciais formados por essas medidas podem ser comparados com os padrões espaciais de outras entidades espaciais.

Segundo MCCULLAGH (1988), os requisitos desejáveis para uma função interpoladora são que: reproduza uma superfície contínua; o tempo de computação não seja proibitivo; tenha propriedades matemáticas de interesse para a aplicação.

Existem alguns métodos de interpolação que são utilizados para auxiliar na geração do MDS, como, por exemplo, o vizinho mais próximo, vizinho natural, o inverso de uma distância, krigagem, curvatura mínima, regressão poligonal, entre outros.

SOUZA (2002) afirma que o algoritmo inverso de uma distância é o que melhor representa a superfície do solo para a geração do modelo digital de superfície (MDS), uma vez que ele possui a característica de suavizar a superfície em estudo. De acordo com FRANKE (1982), o algoritmo de vizinho mais próximo é o método mais simples e tem, como principal característica, assegurar que o valor interpolado seja um dos valores originais, ou seja, não gera novos valores. O produto final desse interpolador é caracterizado por um efeito de degrau.

#### **4.4. Extração fotogramétrica do MDS**

O desenvolvimento da fotogrametria digital tornou possível a automatização das etapas de extração de um MDS, tornando o processo técnica e economicamente mais viável, se comparado com os tradicionalmente utilizados. Com as técnicas de fotogrametria digital, podem ser utilizados algoritmos de correlação automática de imagens digitais, algoritmos e dados para geração automática de curvas de nível, dos processos de ortorretificação, e, em última análise, para a reconstrução do espaço objeto a partir do espaço imagem.

A maior parte dos métodos empregados na extração do MDS foi descrita nos itens anteriores. Para enunciar a extração pelo processo fotogramétrico, será utilizada a seqüência de passos de BRITO e COELHO (2007), a saber:

- a) as imagens devem ser convertidas para o meio digital, de modo a realizar uma conversão do sistema da câmara para o sistema digital; a tarefa seguinte deve ser a orientação interior da imagem (Item 3.4.1);
- b) uma vez concluída a orientação interior, realiza-se a orientação exterior, por fototriangulação por feixes perspectivos (Item 3.5); o importante, ao fim dessa etapa, é obter os parâmetros da orientação exterior, ou seja, a posição tridimensional do centro de perspectiva e os ângulos de atitude da câmara em cada uma das imagens adquiridas;
- c) a tarefa seguinte não é obrigatória, porém, para o caso de extração automática, é desejável; trata-se da normalização do par estereoscópico; essa operação otimiza o algoritmo de localização automática de pontos homólogos;
- d) a partir desse ponto, dá-se a extração semiautomática dos pontos tridimensionais nas formas dispersa e semiregular; o usuário, caso disponha de um sistema de visão estereoscópica, localiza os pontos homólogos e, a partir daí, realiza-se a extração manual;
- e) no caso da extração semiautomática, os pontos homólogos são localizados por correlação de Pearson; a partir de um determinado ponto no terreno, sabendo-se a sobreposição entre as imagens, define-se uma janela de procura na imagem conjugada; esta janela de procura será bastante reduzida, pois as imagens foram normalizadas; encontrando-se o homólogo, segue-se com o processo, repetindo a localização dos pontos, dado um espaçamento pré-definido pelo operador;
- f) após a grade de homólogos identificada, segue-se corrigindo os lugares onde a correlação falhou como em áreas de oclusão, sombras e paralaxe de objetos altos; findas essas correções, realiza-se a interseção espacial (Item 3.4.4) em cada um deles, chegando-se, ao final, às coordenadas tridimensionais para um conjunto de pontos, arranjados (regularmente) em grade;
- g) por fim, caso se queira inserir linhas de quebra, essas podem ser restituídas, seguindo-se a forma de aquisição semiregular, já descrita anteriormente.

## CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

A partir deste ponto do trabalho, esboça-se o processo metodológico para tratar da questão central do estudo concernente à geração e à avaliação do modelo digital de superfície (MDS) obtido a partir de pares estereoscópicos de fotografias aéreas.

Destaca-se que a dissertação enfoca a extração do MDS pelo processo fotogramétrico digital por uma estação educacional livre em desenvolvimento denominada E-Foto e, também, por uma plataforma comercial já consagrada, o LPS (*Leica Photogrammetry Suite*). A análise de seus resultados será realizada no programa ArcGIS com vistas a tornar possível a aplicação dos modelos no monitoramento ambiental e hídrico, com possibilidades de desenvolvimento de estudos hidráulico-hidrológicos na escala da bacia hidrográfica.

A avaliação dos modelos digitais de superfície gerados pelo processo fotogramétrico foi realizada mediante a comparação com o modelo digital de superfície do IBGE (modelo de referência), gerado através dos dados da base cartográfica na escala de 1:25.000 cedida pela própria instituição.

Será utilizado, nesta dissertação, o modelo digital SRTM da Terra, que foi processado e está sendo distribuído na resolução máxima de 90 metros para a América do Sul, por ser muito utilizado pela comunidade científica em estudos ambientais e hidrológicos nos processos de geração de MDS. Por essa razão, foi realizada uma comparação adicional deste com os modelos gerados pelos processos fotogramétricos E-Foto e LPS. Os dados da missão SRTM, disponibilizados pela NASA (Agência Espacial Americana), foram adquiridos a partir do banco de dados construído na Divisão de Cartografia (DICART) da CPRM.

Avaliado cada MDS, eles foram submetidos a aplicações em hidrologia, como, por exemplo, os mapas hipsométrico, de declividade, de aspecto e de curvatura. Por fim, a delimitação de bacias hidrográficas dentro da área de estudo.

A Figura 5.1 sintetiza a abordagem metodológica adotada nesta dissertação através de um fluxograma.

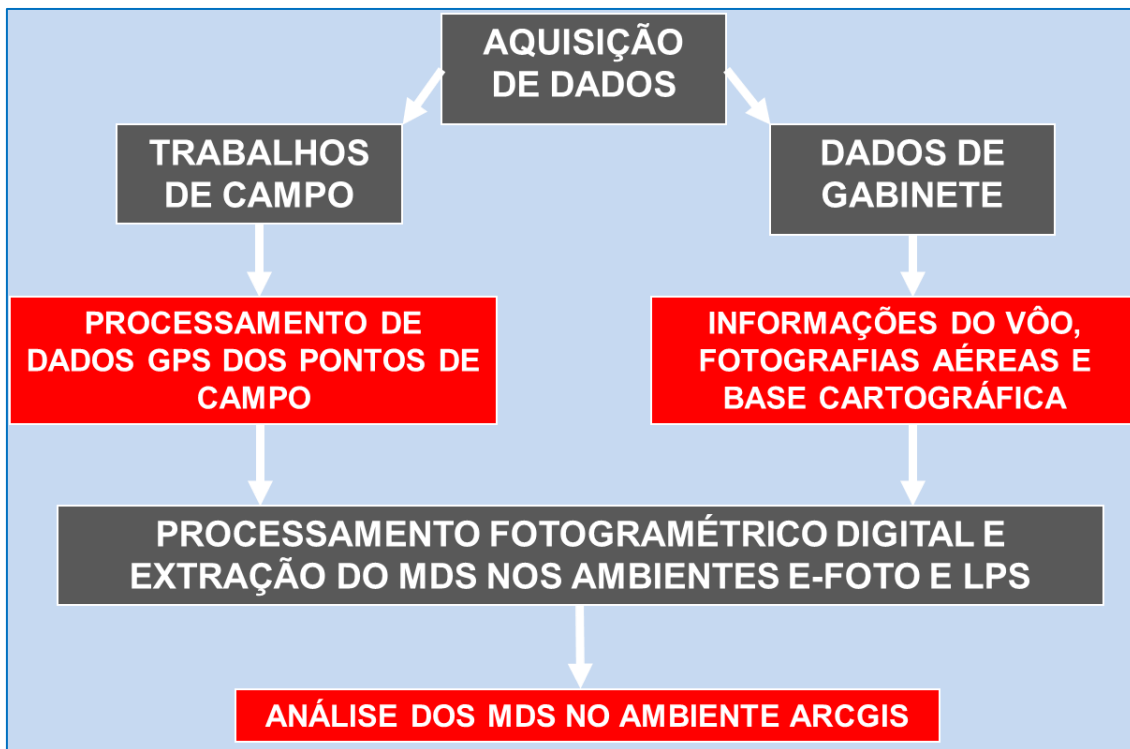


Figura 5.1 - Fluxograma metodológico

Nas seções seguintes, detalham-se os diversos procedimentos que compõem o fluxograma da Figura 5.1, procurando dar suporte e fundamentar as opções feitas na definição metodológica do trabalho. Porém, antes, faz-se necessário o conhecimento da área de estudo.

## 5.1. Aquisição de Dados

Para o desenvolvimento desta dissertação, foram utilizados os dados de gabinete e de campo cedidos gentilmente pelo IBGE. Além de dados de gabinete, houve o trabalho de campo da CPRM para dar suporte a esta pesquisa, que contou com a participação do autor.

### 5.1.1. Trabalhos de Campo

Foi realizada, pela CPRM, uma campanha nos dias 11, 12, 13, 14 e 15 de abril de 2010 para aquisição de pontos de controle para o processamento fotogramétrico digital. Ao todo, foram rastreados, por 50 minutos, 22 pontos de campo, cujas coordenadas foram obtidas através da tecnologia GPS dos receptores geodésicos TECHGEO, modelo GTR-G<sup>2</sup> e antena NOVATEL, modelo 702 GG.

Um aerolevanteamento sobre a região de estudo foi contratado pelo IBGE e executado pela empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S.A em maio de 2006. As informações sobre a altitude, a escala nominal das fotografias, a data da execução e superposições lateral e longitudinal referentes ao vôo aerofotogramétrico realizado foram disponibilizados pelo IBGE e utilizados nesta dissertação como fonte de dados de gabinete para cada estação fotogramétrica digital.

Além dos pontos de apoio de campo da CPRM, foram utilizados 6 pontos de controle ou GCPs (*ground control points*), dentro da área de interesse (1214, 1215, 1223, 1224, 1233, 1234), provenientes do apoio de campo, para o vôo acima citado, realizado pelo IBGE através de receptores GPS pelo método relativo estático, utilizando receptores geodésicos NOVATEL, modelo DL4-PLUS para aerotriangulação do vôo citado. Esses pontos foram rastreados por 30 minutos no dia 28/08/2008, e o sistema geodésico utilizado para o pós-processamento dos dados rastreados foi o SIRGAS 2000.

### 5.1.1.1. Processamento dos Dados GPS dos Pontos de Campo

Para o pós-processamento dos 22 pontos de campo da CPRM, foi utilizado o sistema geodésico SIRGAS 2000. Levou-se em consideração a altura da antena e a ondulação geoidal (Item 2.8). Com esse procedimento, foram obtidas as coordenadas planimétricas e as altitudes ortométricas de cada ponto de campo (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Pontos de campo após o processamento GPS

Ponto	Latitude	Longitude	E (m)	N (m)	h (m)	Altura da Antena (m)	N (m)	H (m)
PC-001-05	22° 20' 04.49691"	43° 11' 17.13698"	686.650.837	7.529.071.654	551.25	2.20	-4.43	553.48
PC-002-05	22° 21' 19.38893"	43° 11' 23.02454"	686.454.695	7.526.770.131	643.13	2.29	-4.43	645.27
BASE = PC-003-05	22° 21' 15.61125"	43° 09' 53.38340"	688.976.854	7.526.800.785	784.44	1.54	-4.43	787.33
PC-006-05	22° 23' 14.33224"	43° 09' 06.51907"	690.316.779	7.523.187.191	813.32	2.41	-4.40	815.31
PC-007-05	22° 23' 55.42854"	43° 10' 57.82756"	687.073.688	7.521.907.416	955.26	2.00	-4.40	957.66
PC-008-05	22° 24' 21.12953"	43° 08' 37.60710"	691.118.851	7.521.123.951	729.38	2.09	-4.40	731.69
PC-010-06	22° 19' 28.88235"	43° 06' 44.44318"	694.467.728	7.530.071.353	787.88	4.35	-4.40	787.93
PC-012-06	22° 20' 24.52405"	43° 06' 34.23609"	694.738.374	7.528.356.217	746.42	3.53	-4.40	747.29
PC-013-06	22° 21' 52.38623"	43° 06' 36.84053"	694.629.929	7.525.654.577	828.40	3.50	-4.40	829.30
PC-014-06	22° 22' 45.82857"	43° 06' 19.66517"	695.100.608	7.524.004.555	945.47	3.50	-4.40	946.37
PC-015-06	22° 24' 09.07752"	43° 06' 13.07879"	695.256.751	7.521.441.447	723.37	2.09	-4.40	725.68
PCQ-004-06	22° 20' 45.99731"	43° 07' 52.85728"	692.480.490	7.527.723.777	762.94	1.15	-4.40	766.19
PCQ-005-06	22° 21' 27.73332"	43° 07' 23.11506"	693.315.510	7.526.429.439	708.63	2.09	-4.40	710.94
PCQ-006-06	22° 22' 08.46317"	43° 07' 39.98451"	692.817.718	7.525.184.234	683.78	2.09	-4.40	686.09
PCQ-007-06	22° 22' 56.57156"	43° 08' 03.08890"	692.137.939	7.523.711.090	714.16	2.44	-4.40	716.12
PCQ-008-06	22° 23' 44.04997"	43° 08' 06.23794"	692.030.191	7.522.253.383	680.01	2.09	-4.40	682.32
PCQ-009-06	22° 24' 47.42900"	43° 07' 36.39006"	692.859.197	7.520.291.698	761.55	3.71	-4.43	762.27
Poço 26	22° 21' 32.03983"	43° 10' 03.46045"	688.726.323	7.526.353.480	869.85	2.04	-4.43	872.24
Poço 27	22° 21' 25.98009"	43° 09' 57.79271"	688.890.748	7.526.537.896	844.20	2.08	-4.43	846.55
Poço 28	22° 21' 34.92469"	43° 10' 10.22515"	688.531.707	7.526.267.088	917.16	2.05	-4.43	919.54
Poço 31	22° 21' 33.01714"	43° 10' 04.82907"	688.686.801	7.526.323.897	870.73	2.09	-4.43	873.07
Poço 32	22° 21' 33.82184"	43° 10' 03.77775"	688.716.578	7.526.298.780	867.94	2.08	-4.43	870.29

Todos os pontos de campo tiveram suas altitudes ortométricas calculadas pelo MAPGEO 2004, devido à época em que foram determinados em campo. Entretanto,

para a área considerada, não houve diferença superior a 13 centímetros quando da comparação com o MAPGEO 2010.

### **5.1.2. Dados de Gabinete**

Foram utilizados dados relevantes para a extração e para a avaliação dos modelos digitais de superfície nas estações fotogramétricas digitais e no ambiente do ArcGis. Esses dados são considerados de gabinete e foram adquiridos através de duas fontes:

- 1) IBGE
  - a) informações sobre o vôo aerofotogramétrico;
  - b) fotografias aéreas da área de estudo provenientes do vôo;
  - c) base cartográfica;
- 2) CPRM
  - a) dados SRTM.

#### **5.1.2.1. Informações Sobre o Vôo Aerofotogramétrico**

Foi obtido e utilizado o certificado de calibração da câmara analógica ou de filme utilizada no vôo aerofotogramétrico (Anexo A), fornecido pelo IBGE, com as informações importantes sobre a altitude de vôo, a escala nominal das fotografias, a data da execução e as superposições lateral e longitudinal referentes à cobertura aerofotogramétrica.

#### **5.1.2.2. Fotografias Aéreas**

Foram usadas as fotografias aéreas digitalizadas em *scanner* fotogramétrico, com resolução geométrica de 21 $\mu$ m, equivalente a 67 cm no terreno. Essas características são provenientes do vôo realizado em maio de 2006, na escala nominal de 1:30.000, com resolução espacial de 0,6350 metro, sobre a região serrana do estado do Rio de Janeiro.

Devido aos critérios da escolha da área de estudo, foram utilizadas 11 fotografias, a saber: 7688, 7689, 7690, 7691 e 7692 (em vermelho) da faixa de vôo 137, além das 7623, 7624, 7625, 7626, 7627 e 7628 (em azul) da faixa 138 (Figura 5.2).

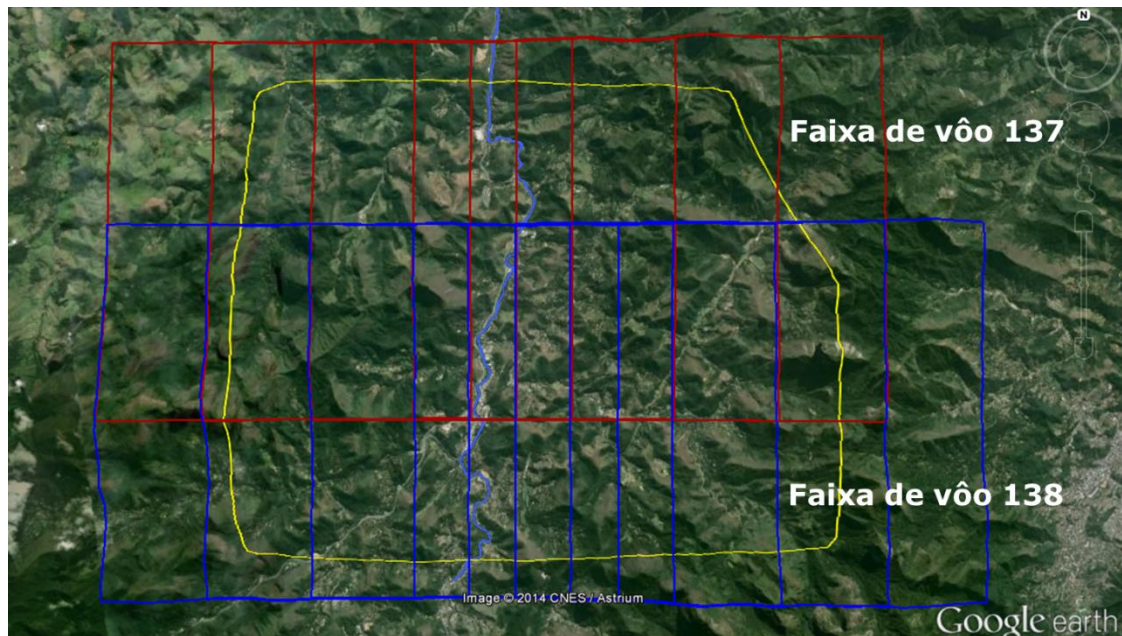


Figura 5.2 - Fotografias aéreas cobrindo toda a área de estudo

### 5.1.2.3. Base Cartográfica

Foi disponibilizado pelo IBGE uma base cartográfica composta por hidrografia, sistema de transportes e curvas de nível, na escala de 1:25.000. Esses dados cartográficos serão utilizados para a validação dos modelos digitais no programa ArcGIS.

## 5.2. Processamento Fotogramétrico Digital e Extração do MDS nos Ambientes E-Foto e LPS

Nas seções seguintes, detalham-se os procedimentos que compõem a Figura 5.3, procurando relatar o fluxo de trabalho a ser seguido em um projeto fotogramétrico em ambas as estações, dando suporte e fundamentando as ações que serão realizadas no Capítulo 6.



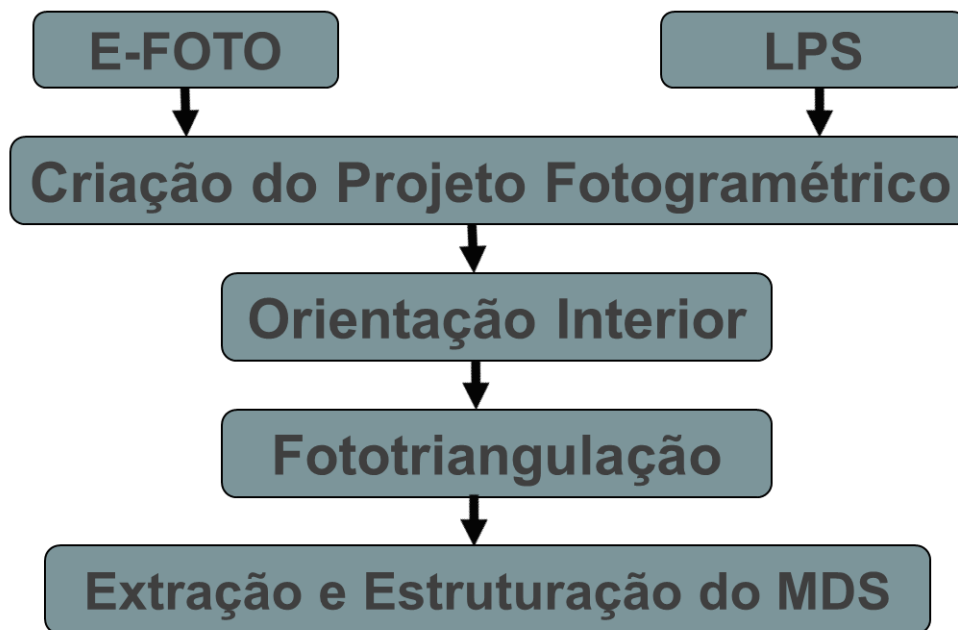


Figura 5.3 - Fluxo de trabalho a ser seguido em um projeto fotogramétrico

### 5.2.1. E-Foto

O projeto E-Foto é uma iniciativa acadêmica de desenvolvimento de código computacional livre para fotogrametria digital, ou seja, uma solução para implementação de uma estação fotogramétrica digital educacional. Esse projeto vem sendo desenvolvido no laboratório de fotogrametria da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), e permite o trabalho com imagens aerofotogramétricas digitalizadas ou adquiridas diretamente por sensores fotogramétricos digitais.

O programa E-foto, na versão 2014.07.376, foi adquirido por acesso à página do próprio projeto na internet: (<http://www.efoto.eng.uerj.br/br/download>).

### 5.2.2. LPS (*Leica Photogrammetry Suite*)

O LPS é um módulo do código computacional ERDAS IMAGINE versão 14.0, que foi gentilmente cedido com uma licença temporária de 60 dias, para uso acadêmico, pela empresa *HEXAGON / SISGRAPH*.

Esse programa foi desenvolvido no intuito de facilitar e otimizar as etapas que estão envolvidas na elaboração de um projeto fotogramétrico. Em outras palavras, foi possível automatizar todas as rotinas antes desenvolvidas manualmente, possibilitando, também, a integração com dados de outros programas.

### **5.2.3. Criação do Projeto Fotogramétrico.**

Em toda a estação fotogramétrica digital, o passo inicial para o desenvolvimento de um projeto fotogramétrico é a sua criação.

Nesse momento, faz-se necessária a posse dos arquivos correspondentes às imagens fotogramétricas da área de interesse, com recobrimento longitudinal e lateral mínimos, em torno de 60% e 30%, respectivamente, o certificado de calibração da câmara ou sensor utilizado na geração das imagens e o memorial descritivo dos pontos de apoio de campo utilizados no projeto (pontos de controle).

### **5.2.4. Orientação Interior**

A realização da orientação interior, como visto no Capítulo 3, é de fundamental importância, pois é através desse processo que se recupera a referência da imagem digital em relação ao sistema de coordenadas métricas da câmara fotogramétrica.

Foram medidas, nas duas estações fotogramétricas, as marcas fiduciais disponíveis nas imagens digitalizadas. A medição das marcas fiduciais permitiu correlacionar a posição em píxeis (linha e coluna) na imagem com a posição em milímetros do sistema de calibração da câmara (Figura 5.4), em que os eixos se cruzam na projeção do eixo óptico da câmara sobre o plano da imagem (ponto principal).

### **5.2.5. Fototriangulação**

Nesta dissertação, foi utilizada aquela que é considerada por (BRITO e COELHO, 2007) uma das soluções matemáticas mais elegantes da engenharia cartográfica, ou seja, a fototriangulação pelo método dos feixes perspectivos. Sua aplicação nas estações E-Foto e LPS permitiu uma economia de tempo no processo fotogramétrico.

Foi realizada a fototriangulação ou aerotriangulação pelo método dos feixes perspectivos para o cálculo e ajustamento de forma conjunta e simultânea das coordenadas dos centros de perspectiva (CP) e dos ângulos de atitude do sensor ( $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ ) no momento da aquisição de cada uma das imagens fotográficas que compõe o bloco fotogramétrico.

Como a estratégia do método se baseia justamente na densificação da quantidade de pontos de apoio de campo disponíveis, que, nessa etapa, são chamados de pontos de

controle, foi realizada a medição de pontos fotogramétricos para a obtenção das suas coordenadas tridimensionais (X, Y, Z).

#### **5.2.6. Extração e Estruturação do Modelo Digital de Superfície**

Após a execução da fototriangulação, e de posse das orientações interior e exterior das imagens fotogramétricas do projeto, foi executado o módulo de extração do MDS nas estações fotogramétricas.

No processo de extração do MDS, foram obtidos e identificados os pontos homólogos e calculadas suas coordenadas no referencial do espaço objeto (X, Y, Z) de cada par estereoscópico pertencente ao projeto fotogramétrico. O próximo passo foi aplicar a interpolação desses pontos para gerar uma estrutura de dados conveniente.

### **5.3. Análise dos Modelos Digitais de Superfície no ArcGIS**

O ArcGIS é um programa desenvolvido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) para desenvolvimento e implementação de sistemas de informações geográficas (SIG). Nesta dissertação, foi usada a versão 10.2 e o módulo ArcInfo, licenciados para a CPRM, possuindo mais ferramentas para a manipulação, edição e análise de dados geográficos. Além disso, o código computacional tem o propósito de organização e visualização de dados, produção de mapas, consulta e análise espacial, incluindo a modelagem do terreno dentre outras ferramentas.

Foi utilizado, para estruturação, visualização e avaliação de cada MDS gerado nos programas de fotogrametria E-Foto e LPS, o modelo digital do IBGE, que garantiu que todos os modelos fossem avaliados com o mesmo critério. Adicionalmente, para efeito de comparação, empregou-se a base SRTM. Para esse procedimento, foram exportadas as coordenadas tridimensionais das nuvens de pontos que configuram cada MDS extraído.

Por fim, explorou-se a obtenção de alguns mapeamentos de natureza hidrológica e ambiental a partir dos modelos digitais de superfície elaborados.

## CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIABANHA/RJ

### 6.1. Área de Estudo

A área de estudo foi estrategicamente escolhida por apresentar características topográficas heterogêneas. Localizada na bacia do rio Piabanha, no município de Petrópolis, mais precisamente no distrito de Itaipava, a área possui um relevo fortemente acidentado, com mata nativa e, ao mesmo tempo, contém forte mancha urbana. É cortada pelo rio Piabanha e pela rodovia Washington Luiz (BR-040) e está localizada geograficamente entre as seguintes coordenadas: 22° 19' S e 22° 25' S; 43° 04' O e 43° 04' O.

Trata-se de área contida na bacia do rio Piabanha, adotada pelo Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ para a condução de diversos projetos de pesquisa, concebidos, desde o ano de 2003, de forma integrada, sob o nome de Estudos Integrados de Bacias Experimentais (EIBEX). Adicionalmente, segundo essa diretriz, conta-se com o apoio da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e de outras instituições do estado do Rio de Janeiro. Em especial, a região constitui um desafio à execução de um mapeamento fotogramétrico e ao estudo da geração de modelos digitais de superfície.

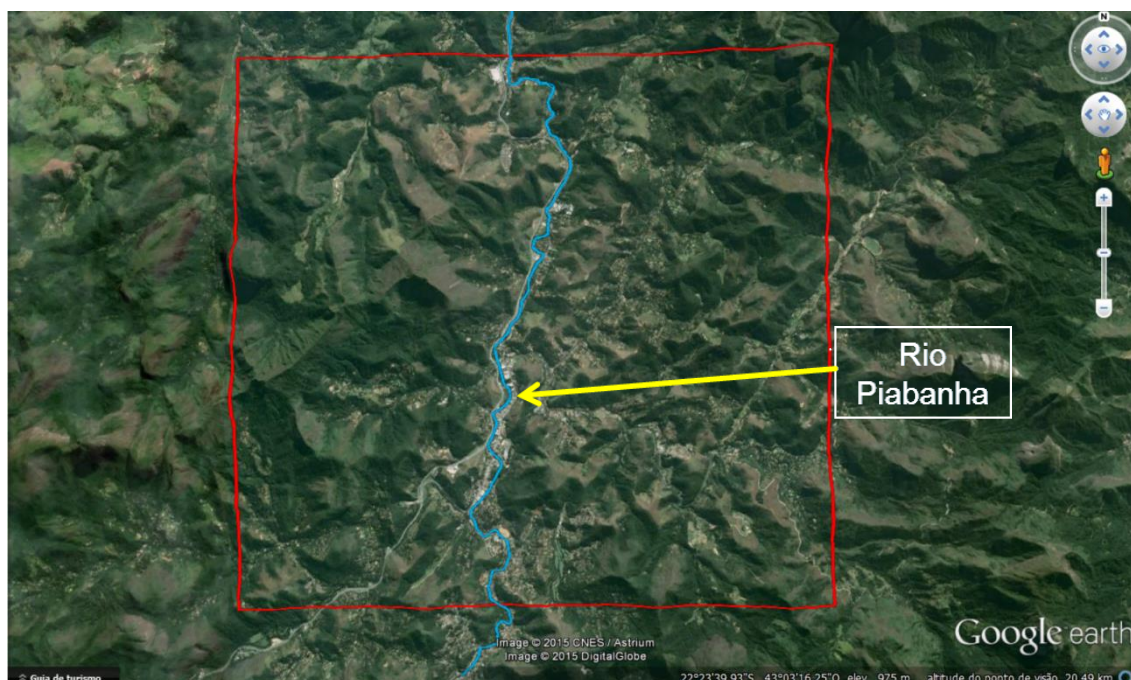


Figura 6.1 - Área de estudo dentro da bacia hidrográfica do rio Piabanha

Fonte: Google Earth (2014)

## **6.2. Fisiografia da Bacia**

A bacia é caracterizada por um relevo montanhoso e acidentado de modo geral, com afloramentos rochosos e altitudes que variam de 500 metros até 2.000 metros.

A grande cobertura florestal natural da bacia do Piabanha dá-se, pelas restrições impostas pelo relevo, o que restringe muito as ocupações. Essa cobertura chega a ultrapassar 30%, o que é considerado relativamente alto, levando em conta que a média das sub-bacias do Paraíba do Sul é de 11% (EIBEX-I, 2010). Mesmo assim possui uma alta vulnerabilidade à erosão na maior parte da bacia, devido às condições de solo, relevo e a elevada pluviosidade anual, com chuvas torrenciais.

De acordo com o relatório do projeto EIBEX-I (2010), a região está situada geomorfologicamente na unidade Serra dos Órgãos. O reverso desse conjunto topográfico é definido por seu aspecto morfoestrutural, caracterizado por lineações de vales estruturais de cristas serranas, maciços graníticos, morros com desníveis altimétricos acentuados e alvéolos intermontanos. Essas feições refletem áreas de dobramentos remobilizados sob a forma de blocos justapostos. A drenagem da Serra dos Órgãos desenvolve-se sob o controle lito-estrutural, apresentando padrões paralelos e sub-paralelos.

## **6.3. Uso e Ocupação do Solo**

A sua ocupação remonta ao período colonial do início do século XIX. Os principais núcleos urbanos, Petrópolis e Teresópolis, que, juntos, têm mais de 350.000 habitantes, instalaram-se em regiões intermontanas, em fundo de vales, nos exíguos terraços fluviais, por vezes atingindo as encostas íngremes e expandindo-se pelos vales dos rios Piabanha e Preto, respectivamente.

Devido à proximidade com o município do Rio de Janeiro, ocorreu um crescimento urbano acentuado e inadequado para as condições ambientais da bacia. A qualidade dos recursos hídricos é prejudicada pelo lançamento de esgotos *in natura*, sem qualquer tipo de tratamento. Além disso, as vazões naturais dos rios são muito baixas para a diluição das cargas lançadas, resultando em altos índices de poluição. É importante ressaltar que o uso industrial e agrícola na bacia também são responsáveis pela erosão dos solos e degradação das águas, assim como o uso urbano.

Devido ao nível de ocupação e a intensidade de uso das terras e das águas da bacia do rio Piabanha, existe a extrema necessidade da realização de ações de proteção e recuperação de florestas, solos e águas, sendo recomendadas medidas rigorosas de restrição de uso, especialmente no curso superior do rio Piabanha e de seu afluente Preto, que devem receber prioridade máxima na proteção das florestas, na recuperação de áreas degradadas, no planejamento e controle do parcelamento do solo urbano e dos usos da água, em geral, e do uso agrícola em especial.

Qualquer atividade de uso e ocupação do solo de uma determinada área terá resultados diretos nos recursos hídricos, interferindo, assim, na qualidade da água. Segundo TARIFA *et al.* (2005), as águas superficiais de lagos e rios têm suas propriedades físicas, químicas e biológicas definidas pelas características das bacias hidrográficas.

#### **6.4. Clima e Regimes Pluviométricos e Hidrológicos**

A bacia possui clima tropical de altitude úmido na região serrana, com temperaturas médias a baixas. As regiões de baixada, tanto pelo efeito adiabático como pela continentalidade, está condicionada a amplitudes térmicas distintas de inverno e verão de um clima subúmido.

A elevada pluviosidade da região pode ser explicada por se tratar de uma bacia hidrográfica localizada em uma região tropical e próxima à superfície oceânica, e pelos mecanismos dinâmicos de massas de ar polares e oceânicas e linhas de instabilidade, além de fatores estáticos orográficos proporcionados pela orientação SO/NE da Serra do Mar.

Segundo o relatório do EIBEX-I (2010), seu posicionamento expõe a região ao fluxo meridional de ar frio, oriundo do pólo sul sobre as águas quentes oceânicas, assegurando-lhe ainda maior frequência de invasão de frentes frias e de linhas de instabilidade tropical. A sua topografia bastante acidentada, que é proporcionada por rochas cristalinas do escudo brasileiro, aumenta a turbulência do ar pela ascendência orográfica, favorecendo as precipitações.

Nas encostas íngremes, a pluviosidade média anual ultrapassa os 2.500 mm, como nas cidades de Petrópolis e Teresópolis. Nas vertentes mais íngremes e elevadas, acima dos 2000 metros, identificam-se formações rupestres e campos de altitude como

nas proximidades dos campos do Sino e do Açú, onde podem ocorrer temperaturas negativas, inclusive com geada. Nas proximidades dos municípios de Areal e São José do Rio Preto, a média pluviométrica decresce abruptamente para 1.300 mm, com períodos secos e déficit hídrico bastante pronunciado (EIBEX-I, 2010).

O ano hidrológico na bacia do Piabanha coincide com o da bacia do Paraíba do Sul, correspondendo ao período de setembro a agosto. As maiores vazões ocorrem em dezembro, janeiro, fevereiro e março e as mínimas em julho, agosto e setembro (EIBEX-I, 2010).

A distribuição das precipitações ao longo do ano está representada na Figura 1.2 para o município de Petrópolis. Identificam-se o período de chuvas começando em agosto, o trimestre mais chuvoso nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, e o mês de julho sendo o mais seco.

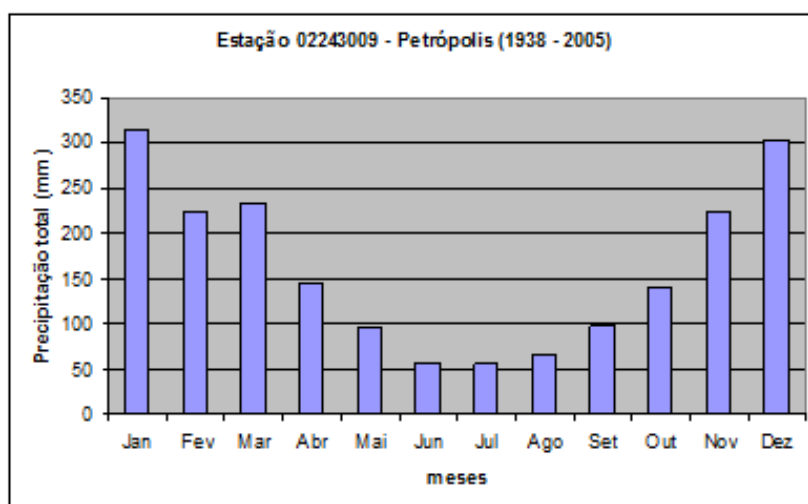


Figura 6.2 - Totais de precipitação mensal em Petrópolis/RJ  
Fonte: EIBEX-I (2010)

### **6.5. Processamento do Bloco Fotogramétrico e Extração do MDS no Ambiente E-Foto**

Para o processamento do bloco fotogramétrico no ambiente E-Foto, foi utilizado um microcomputador, dotado de um processador Intel Core i7 3.40GHz, 32 Gb de memória RAM, sistema operacional de 64 bits, HD de 1 Tb.

### 6.5.1. Criação do Projeto Fotogramétrico

Para dar início às etapas de criação do processo de fotogramétrico no ambiente E-Foto, foram preenchidos alguns dados de entrada referentes ao nome, descrição, autor, objetivos, entre outros.

Uma vez criado o projeto (Figura 6.3), foi necessário também preencher alguns dados como as características do sensor utilizado, do vôo aerofotogramétrico, do terreno e dos pontos de apoio de campo.

**Project Header**

Name:

Description:

Owner:

Goals:

Context:

---

Metadata

File path:

File name:

Creation date:

Modification date:

Figura 6.3 - Formulário com os dados iniciais do projeto E-Foto

O passo seguinte foi o preenchimento dos dados relacionados ao terreno, como mostra a Figura 6.4. Esses dados são relativos à região de interesse e são informações necessárias as etapas fotogramétricas subseqüentes.



Terrain	
Max Altitude	1500.000 m
Min Altitude	530.000 m
Mean Altitude	900.000 m
GRS	SIRGAS2000
CPS	UTM
UTM Fuse	23
Approximate geographic coordinates of center project area	
Latitude	22°22'37.00000"
	Southern Hemisphere
Longitude	43°8'34.00000"
	West of Greenwich

Figura 6.4 - Formulário com dados do terreno

Outros dados de entrada são também necessários ao processamento fotogramétrico, como os valores referentes às altitudes máxima, mínima e média, assim como as coordenadas aproximadas do centro da área de trabalho, o plano médio da área imageada, o sistema geodésico de referência e a projeção cartográfica. Esses parâmetros serão também utilizados nas etapas posteriores, como na manipulação da nuvem de pontos em ambiente ArcGIS. Há de se observar que o sistema de projeção disponibilizado pelo E-Foto é o UTM, que atende à maioria das necessidades de referências de coordenadas de terreno.

Foram inseridos os dados do sensor vindos do certificado de calibração da câmara. Estes dados são: a distância focal calibrada, os valores dos coeficientes das distorções descentrada e radial simétrica, além das coordenadas das marcas fiduciais. Na Figura 6.5, é possível observar os dados relativos ao sensor fotogramétrico.

**Sensor**

Sensor Id:

Description:

Type

Detector:  Platform:

Geometry:  Energy Source:

Calculation Model:

Camera Calibration Certificate:

Number:  Dispatch:  Expiration:

Sensor Parameters

Standard Deviation:

Calibrated Focal Length (mm):  StDev:

Coordinates of Principal Point (mm)

Standard Deviations:

$x_0$ :  StDev:

$y_0$ :  StDev:

Radial Symmetric

Standard Deviations:

$k_0$ :  StDev:

$k_1$ :  StDev:

$k_2$ :  StDev:

$k_3$ :  StDev:

Decentered

Standard Deviations:

$P_1$ :  StDev:

$P_2$ :  StDev:

Figura 6.5 - Dados do sensor

Foram também inseridos dados do voo aerofotogramétrico, como altitude de voo, escala nominal da cobertura aérea, data da execução e sobreposições (Figura 6.6). Os dados referentes ao valor das sobreposições longitudinal e transversal entre as imagens e faixas de voo são essenciais na etapa de geração do MDS. Para que o algoritmo possa estabelecer uma janela de busca para encontrar seu par homólogo, é necessário que se conheça a porcentagem da imagem da esquerda que se repete na imagem da direita. Em termos mais específicos, é preciso saber quantos píxeis de uma imagem se repetem na imagem adjacente.

**Flight**

Flight Information	
Flight Id	xx
Producer's Name	Base S.A
Description	
Date of Flight Execution	16/05/2006
Flight Parameters	
Nominal Flight Altitude Above Sea Level (m)	4852.00
Nominal Scale	1:30000
Longitudinal Overlap (%)	60.00
Transversal Overlap (%)	30.00

Figura 6.6 - Dados do voo

Uma vez inseridos todos esses dados, foram iniciadas as operações de orientação interior e fototriangulação.

### 6.5.2. Orientação Interior

A orientação interior das 11 imagens foi realizada observando-se a posição em milímetros das marcas fiduciais e a distância focal calibrada da câmara, dados obtidos no respectivo certificado de calibração. Foram medidos os centros geométricos de cada uma das 8 marcas fiduciais, de modo a obter a reconstrução do feixe perspectivo com a melhor exatidão possível (Figura 6.7).

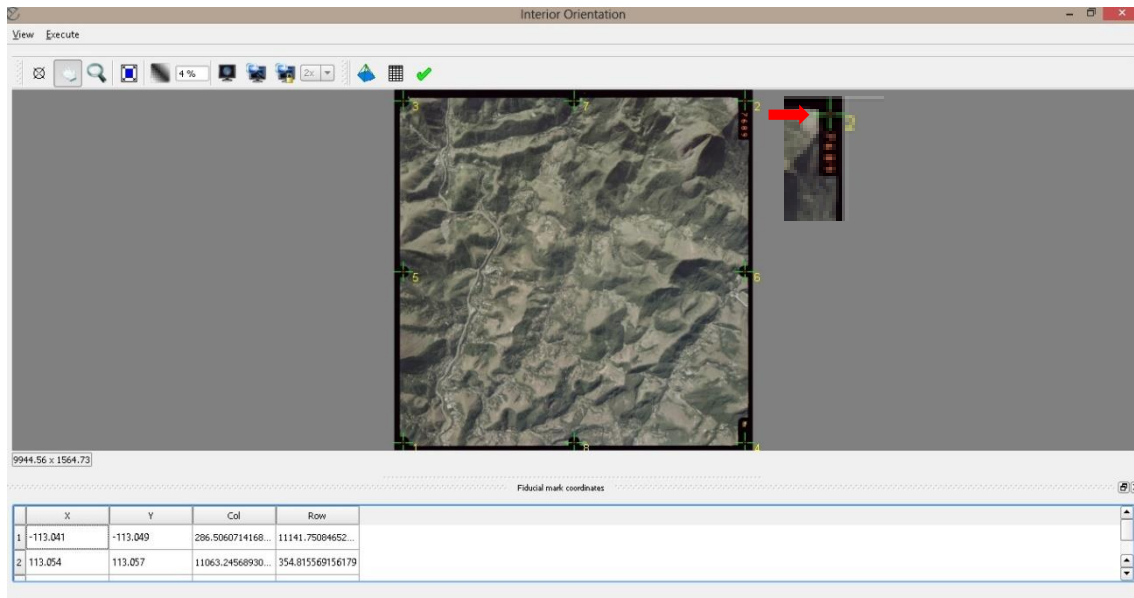


Figura 6.7 - Interface do módulo de orientação interior

### 6.5.3. Orientação Exterior

Como estratégia de cálculo dos seis (6) parâmetros da orientação exterior para as imagens, foi utilizada a fototriangulação pelo método dos feixes perspectivas, ou seja, a execução de uma ressecção espacial simultaneamente à execução da interseção espacial para as 11 imagens da área de interesse, associadas às coordenadas no espaço-objeto de uma série de pontos fotogramétricos medidos sobre as imagens.

### 6.5.4. Fototriangulação

Para o cálculo do ajuste da aerotriangulação pelo método dos feixes perspectivas, medem-se, nas imagens, os pontos de apoio de campo disponíveis. Porém a quantidade desses era reduzida. Por outro lado, como a estratégia do método se baseia justamente na minimização da quantidade de pontos de apoio de campo, foi necessária a medição de pontos fotogramétricos para a densificação dos pontos de controle e para permitir a ligação adequada entre as imagens do bloco.

Foram medidos 45 pontos fotogramétricos nas 11 imagens da área através da análise par a par das imagens, medindo-se manualmente pares de pontos homólogos nas áreas de sobreposição (longitudinal de 60% e lateral de 30%) das mesmas. Com esse procedimento, um ponto fotogramétrico pode aparecer em várias imagens simultaneamente. Somados aos pontos fotogramétricos, há também os 21 pontos de apoio de campo (Figura 6.8).

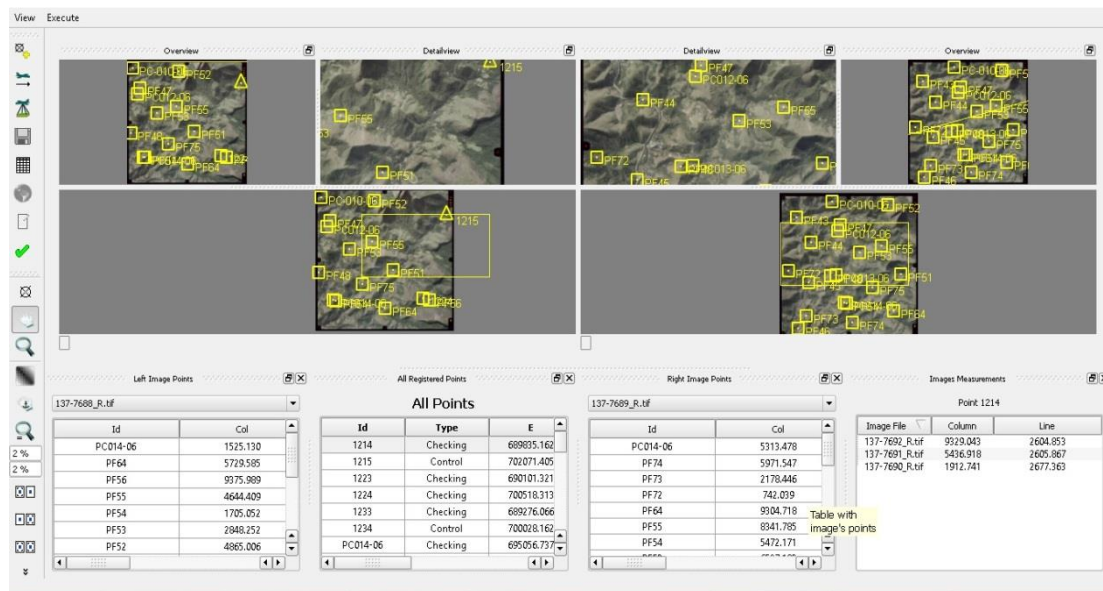


Figura 6.8 - Interface do módulo de fototriangulação

Fonte: SILVA (2014)

Após a medição dos pontos fotogramétricos, foi necessário informar, ao código computacional, a direção do vôo (oeste para leste), sendo esse um parâmetro inicial para o ajuste do bloco fotogramétrico. O ajuste deu-se através da inserção dos valores de tolerância para a convergência métrica e angular, inserção das imagens que serão consideradas no cálculo e dos pontos fotogramétricos e de controle utilizados.

Como foi utilizado o ajuste fotogramétrico pelo método dos feixes perspectivos, ocorreu uma redução no uso de pontos de controle. Para chegar ao conjunto final de pontos utilizados, foi adotada a metodologia proposta por SILVA(2014):

- 1) execução do ajuste com todos os pontos de apoio de campo e fotogramétricos (21 pontos de campo e 45 pontos fotogramétricos);
- 2) verificação dos resíduos encontrados para cada um dos pontos e do erro médio quadrático encontrado;
- 3) exclusão de pontos com valores de resíduos elevados e também que não contribuam para uma distribuição de pontos adequada;
- 4) nova execução com os 45 pontos fotogramétricos e com os pontos de apoio de campo não retirados (pontos de controle); os pontos retirados são determinados como pontos de verificação;
- 5) repetição das etapas anteriores até encontrar resultado satisfatório.

Para se chegar a um resultado satisfatório, foi executado o ajuste do bloco com 3 pontos de apoio de campo e com os 45 pontos fotogramétricos. É importante ressaltar que os pontos de controle que foram retirados são renomeados como pontos de verificação e serão utilizados posteriormente (Tabela 5.1).

Para determinar as incógnitas geradas pelos 6 parâmetros das 11 imagens utilizadas, além dos 45 pontos fotogramétricos, cada um possuindo 3 incógnitas, utilizou-se uma quantidade superior de equações, o que permitiu o ajuste do bloco fotogramétrico pelo método dos feixes perspectivos.

A partir dos pontos de controle e fotogramétricos que foram medidos nesse módulo, foi iniciado o processo de extração do modelo numérico de superfície.

Tabela 5.1- Pontos de controle e verificação

Pontos de Campo	Tipo	Coordenadas Planialtimétricas (m)		
		E	N	H
1215	Controle	702071	7528827	1001,79
1234	Controle	700028	7519435	1173,07
PC007-05	Controle	687074	7521907	958,37
1214	Verificação	689835	7528604	773,43
1223	Verificação	690101	7522795	704,13
1224	Verificação	700518	7523885	987,82
1233	Verificação	689276	7518665	691,17
PC001-05	Verificação	686607	7529017	520,18
PC002-05	Verificação	686411	7526716	612,81
PC006-05	Verificação	690273	7523133	784,80
PC008-05	Verificação	691119	7521124	733,68
PC010-06	Verificação	694424	7530017	756,51
PC012-06	Verificação	694694	7528302	714,52
PC013-06	Verificação	694586	7525600	796,70
PC014-06	Verificação	695057	7523950	913,48
PC015-06	Verificação	695213	7521387	691,87
PCQ005	Verificação	693272	7527669	679,70
PCQ006	Verificação	692818	7525184	686,06
PCQ007	Verificação	692094	7523657	681,18
PCQ008	Verificação	692030	7522253	682,87
PCQ009	Verificação	692815	7520237	729,45

### 6.5.5. Extração do Modelo Digital de Superfície

Depois de cumpridas todas essas etapas anteriores, iniciou-se o processo de extração automática do modelo digital de superfície.

Segundo SILVA (2014), num primeiro momento, a reconstrução do espaço-objeto dar-se-á de forma automática, levando em conta a extração modelo a modelo, ou seja, os pontos de controle e fotogramétricos pertencentes a cada modelo são os pontos de partida para o cálculo dessa reconstrução automática do terreno. Nas áreas de sobreposição de modelos, haverá, ao fim do cálculo, informação redundante para uma mesma área, mas advinda de processos diferentes.

Utilizando-se a ferramenta *DEM-Extraction* na aba *Automatic Extraction* (Figura 6.9), foram ajustados os parâmetros para a extração automática do MDS. A extração da nuvem de pontos com suas coordenadas de terreno ocorreu através da técnica de crescimento de regiões, em que a correspondência de um ponto com o seu homólogo determinou o seu uso. O método escolhido para realizar a medição automática dos pares de pontos homólogos foi o algoritmo de mínimos quadrados LSM (*least-squares matching*).

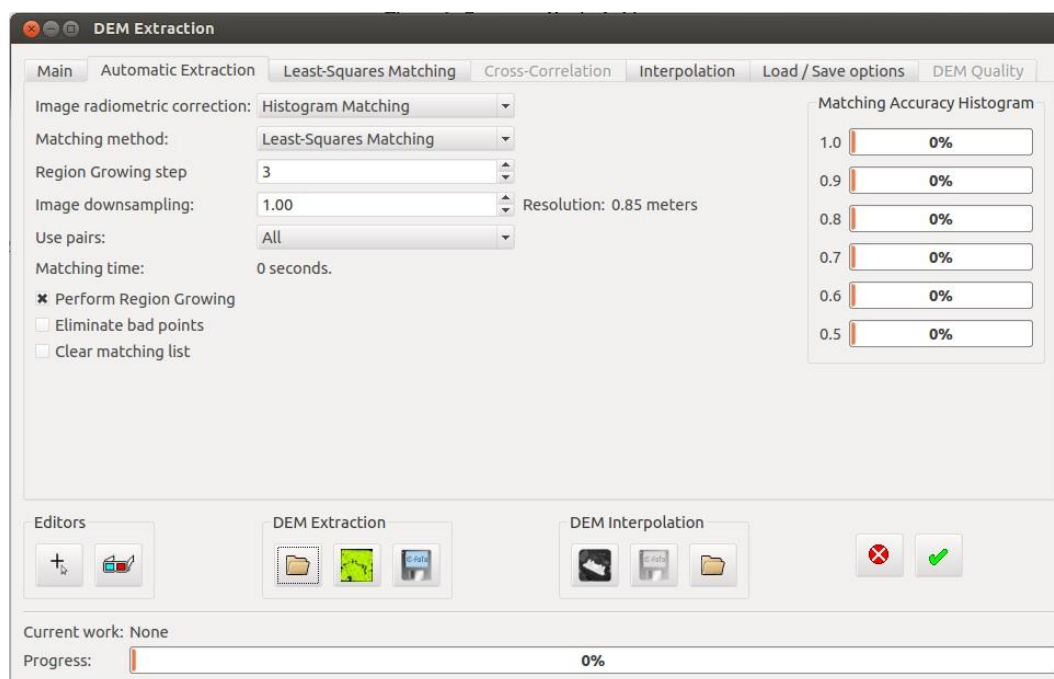


Figura 6.9 - Interface do módulo de extração do MDS

Fonte: SILVA (2014)



De acordo com SILVA (2014), para minimizar a ocorrência de regiões em que não há correspondência, alguns pares de pontos homólogos (sementes) foram adicionados manualmente. Para esse processo, foram adicionadas 576 sementes de forma a se obter a correspondência em uma área maior, diminuindo os vazios em que não se têm coordenadas de terreno conhecidas (Figura 6.10).

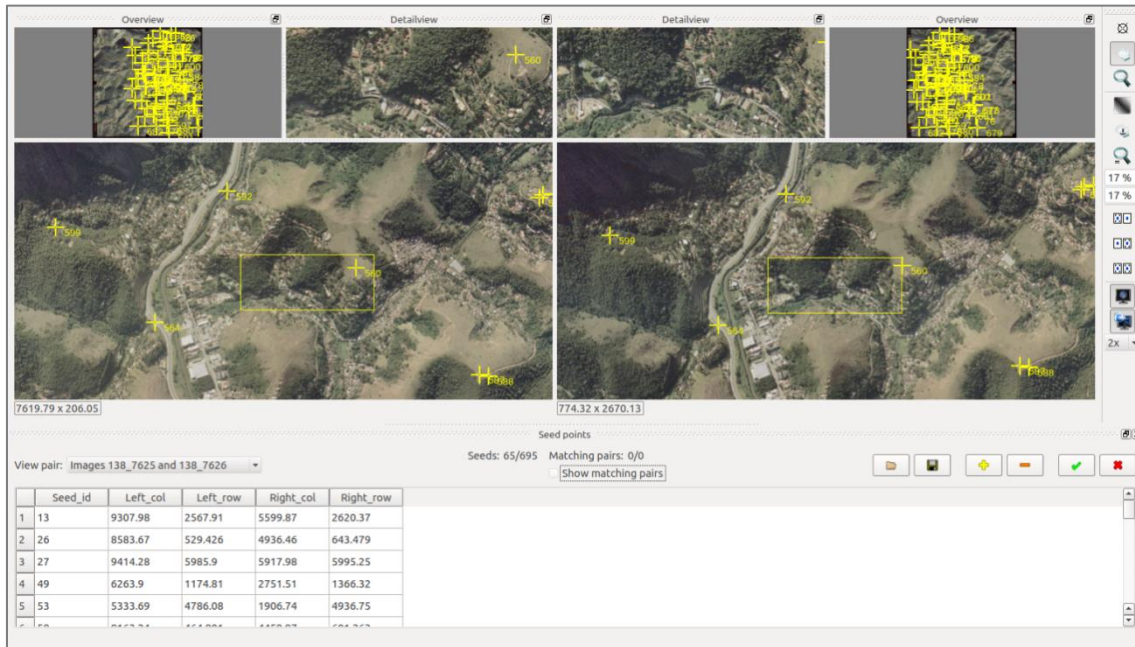


Figura 6.10 - Adição de pontos fotogramétricos  
Fonte: SILVA (2014)

No E-Foto, para a extração do MDS, é importante a escolha de uma ferramenta chamada *image downsampling*. Através dela, foi possível reduzir a resolução geométrica das imagens para a execução da extração automática (Figura 6.11).



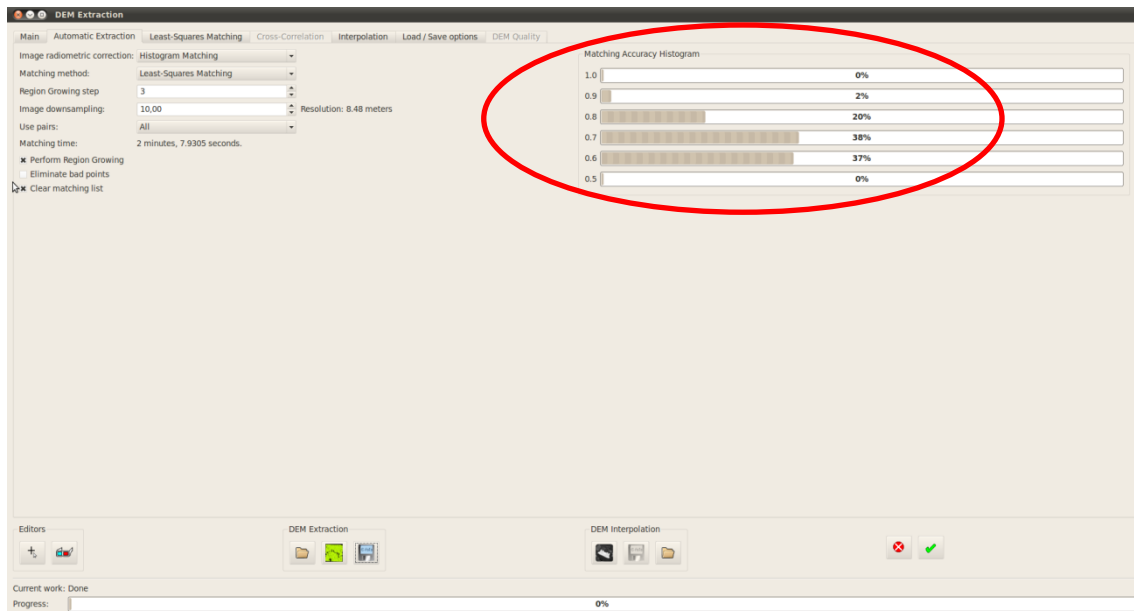


Figura 6.11 - Escolha do procedimento de amostragem (*downsampling*)

As coordenadas tridimensionais da nuvem de pontos, que configuram o MDS do E-Foto, foram exportadas para o ArcGIS, em formato texto (txt), com o objetivo de gerar uma malha de pontos com a correlação igual ou superior a 0.9 pelo método dos mínimos quadrados, como mostra a Figura 6.11. Assim, foi possível trabalhar com pontos extraídos de boa confiabilidade nas etapas de geração do modelo de superfície.

## 6.6. Processamento do Bloco Fotogramétrico e Extração do MDS no Ambiente LPS

Para o processamento do bloco fotogramétrico no ambiente LPS, foi utilizado um computador *Notebook* HP, com processador Intel Core i7 2.70GHz, 8 Gb de memória RAM, sistema operacional de 64 bits e HD de 500 Gb.

### 6.6.1. Criação do Projeto Fotogramétrico

Para a criação do processo fotogramétrico utilizando a plataforma LPS, foram necessárias as informações obtidas no certificado de calibração da câmara, tais como: geometria da câmara aérea (Figura 6.12), posição em milímetros das marcas fiduciais (Figura 6.13) e alguns outros parâmetros (Figura 6.14). Esses parâmetros são necessários para a reconstrução do feixe perspectivo no instante da tomada da fotografia.

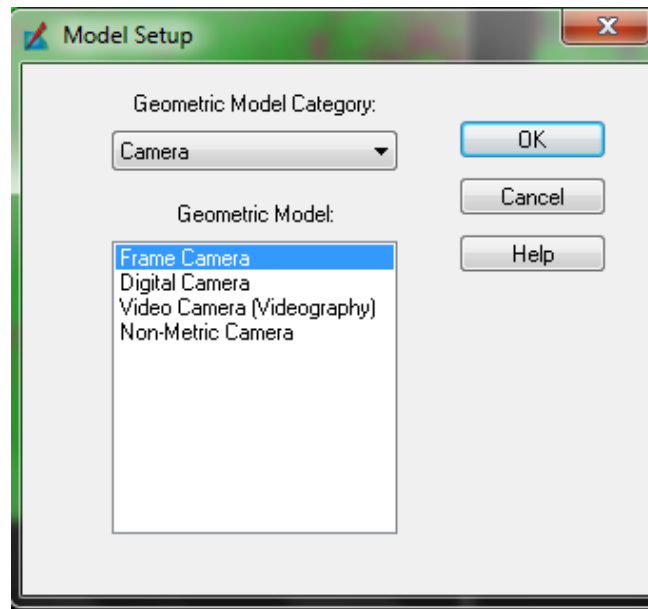


Figura 6.12 - Escolha do modelo geométrico da câmara

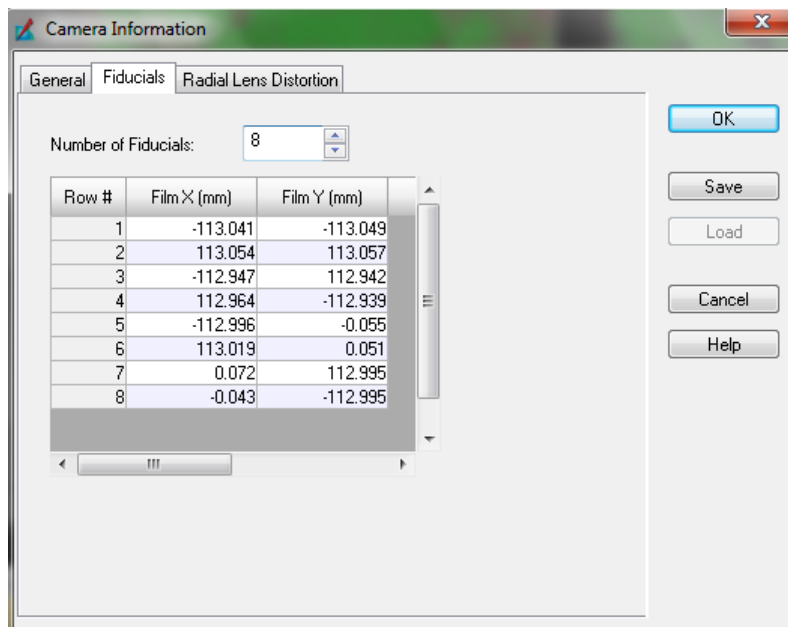


Figura 6.13 - Número de marcas fiduciais e suas coordenadas

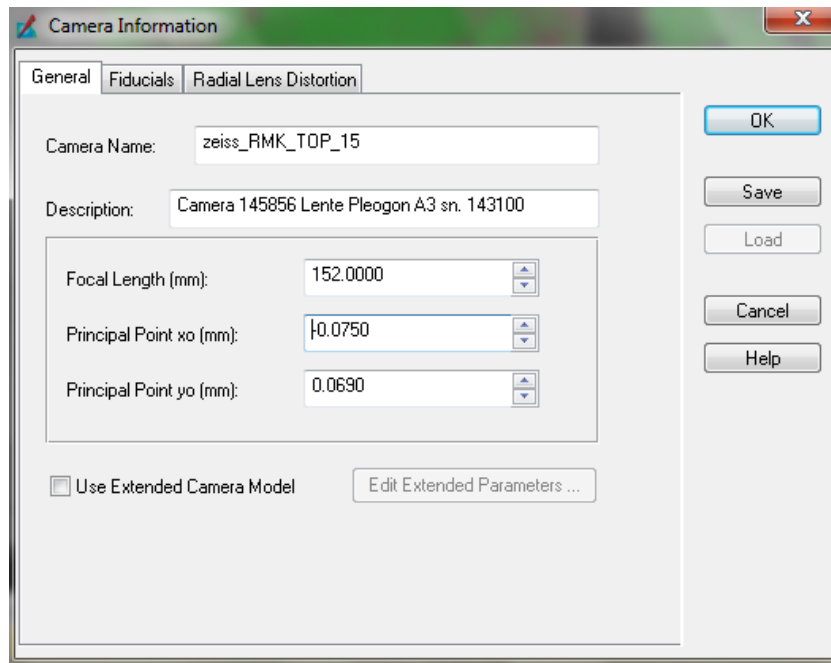


Figura 6.14 - Parâmetros da câmara fotogramétrica

O passo seguinte foi a escolha do sistema de coordenadas que serve para o posicionamento de pontos sobre uma superfície de referência. Normalmente, adota-se um sistema de projeção cartográfica para representar a superfície terrestre sobre um plano. No caso desta dissertação, foram selecionados os mesmos parâmetros utilizados no programa E-Foto e anteriormente descritos (Figura 6.15).

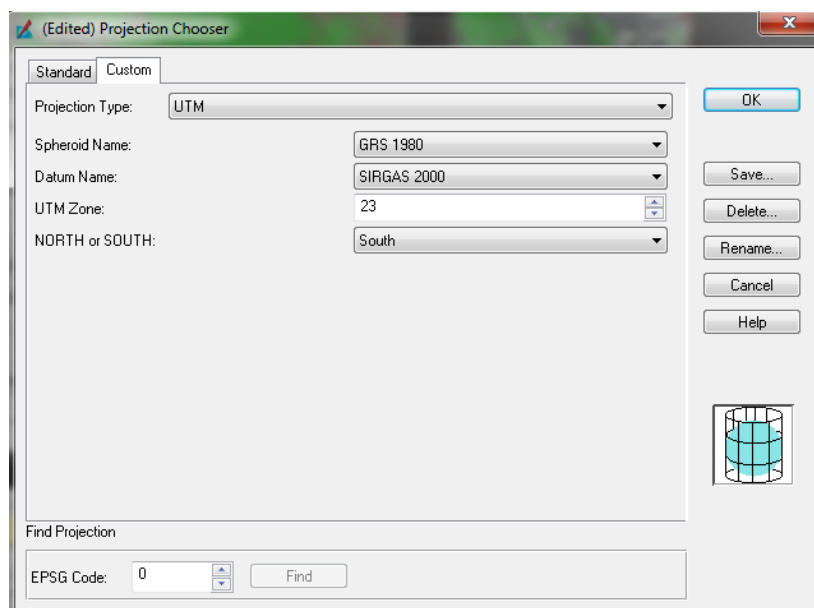


Figura 6.15 - Seleção da projeção e *datum* adotado

A Figura 6.16 ilustra a adição das imagens que serão utilizadas no processo fotogramétrico.

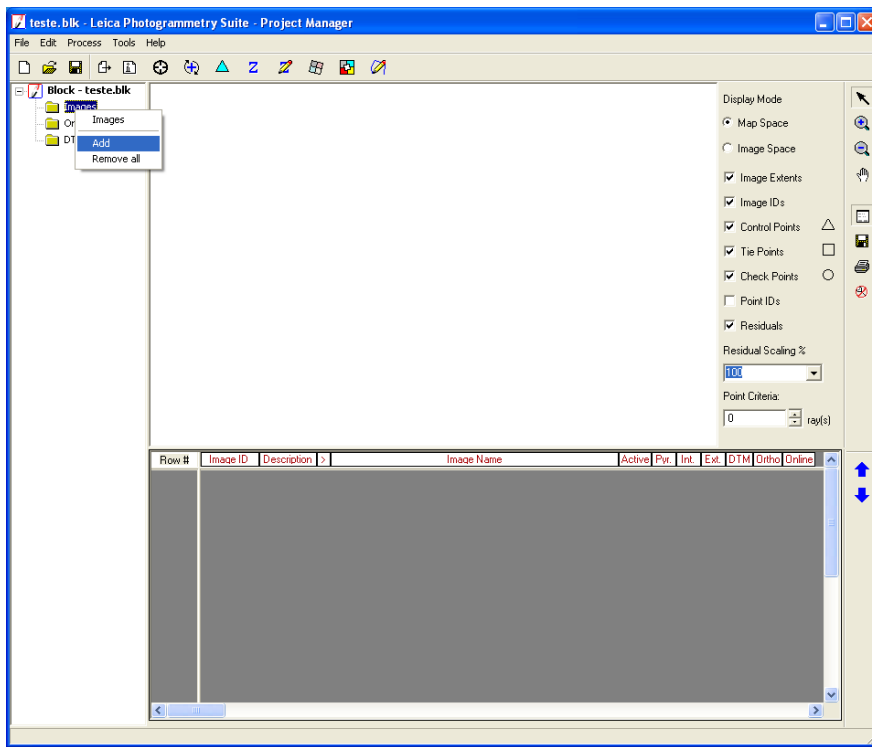


Figura 6.16 - Procedimento para adição das imagens  
Fonte: manual do LPS

Já a Figura 6.17 mostra as propriedades do bloco, como, por exemplo, dados sobre a altitude de vôo.

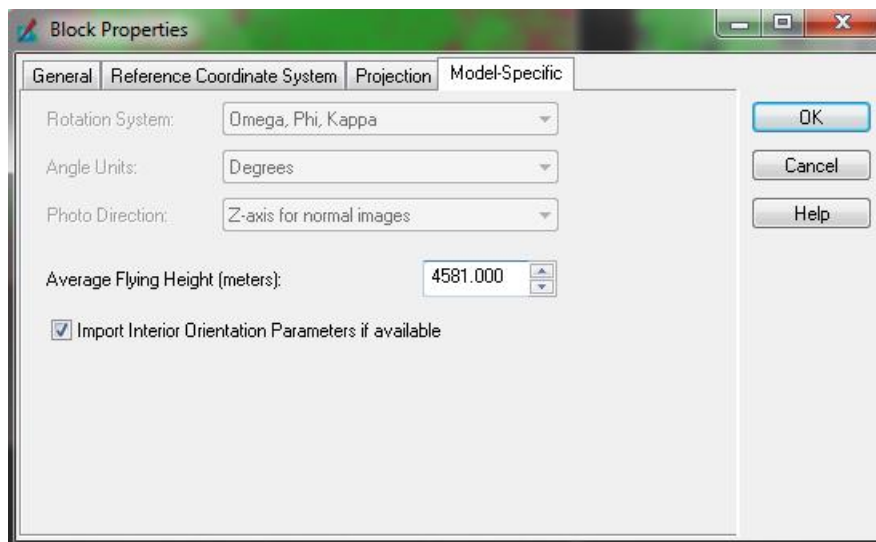


Figura 6.17 - Propriedades do bloco fotogramétrico

Após a inserção dos parâmetros que constam no certificado de calibração, as 11 imagens também foram adicionadas ao projeto. Em seguida, foi gerada automaticamente a pirâmide das imagens, requinte operacional do programa ora em questão.

Algo fundamental, nesses projetos, é verificar o norte de cada fotografia e, se necessário, rotacioná-las antes de serem inseridas.

### 6.6.2. Orientação Interior

Para o início da orientação interior, foi necessário definir a orientação das marcas fiduciais. Para essa etapa, deve-se observar o sentido crescente das fotos aéreas, isto é, na seqüência da faixa de vôo. No vôo utilizado nesta dissertação, a numeração das fotografias da faixa 137 está crescendo da direita para esquerda; logo, foi necessário modificar o estado inicialmente atribuído no código computacional de “right” para “left”. Já a numeração das fotografias da faixa 138 cresce da esquerda para direita. Portanto, não foi preciso alterá-las como mostra a Figura 6.18.

Row #	Image ID	Image Name	Sensor Name	Orientation	Xo	Yo	Zo	Omega	Phi	Kappa
1	1	137-7688_r	zeiss_RMK_TOP_15	Left+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
2	2	137-7689_r	zeiss_RMK_TOP_15	Left+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
3	3	137-7690_r	zeiss_RMK_TOP_15	Left+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
4	4	137-7691_r	zeiss_RMK_TOP_15	Left+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
5	5	137-7692_r	zeiss_RMK_TOP_15	Left+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
6	6	138_7623	zeiss_RMK_TOP_15	Right+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
7	7	138_7624	zeiss_RMK_TOP_15	Right+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
8	8	138_7625	zeiss_RMK_TOP_15	Right+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
9	9	138_7626	zeiss_RMK_TOP_15	Right+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
10	10	138_7627	zeiss_RMK_TOP_15	Right+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
11	11	138_7628	zeiss_RMK_TOP_15	Right+X	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 6.18 - Direção de vôo

Na Figura 6.19, é possível observar a interface de medição das oito marcas fiduciais em uma das imagens. A partir desse ponto, o processo foi executado de maneira automática para as 11 imagens, pressionando-se o botão “auto locate”. O resultado desses parâmetros foi obtido por uma tabela fornecida pelo código computacional.

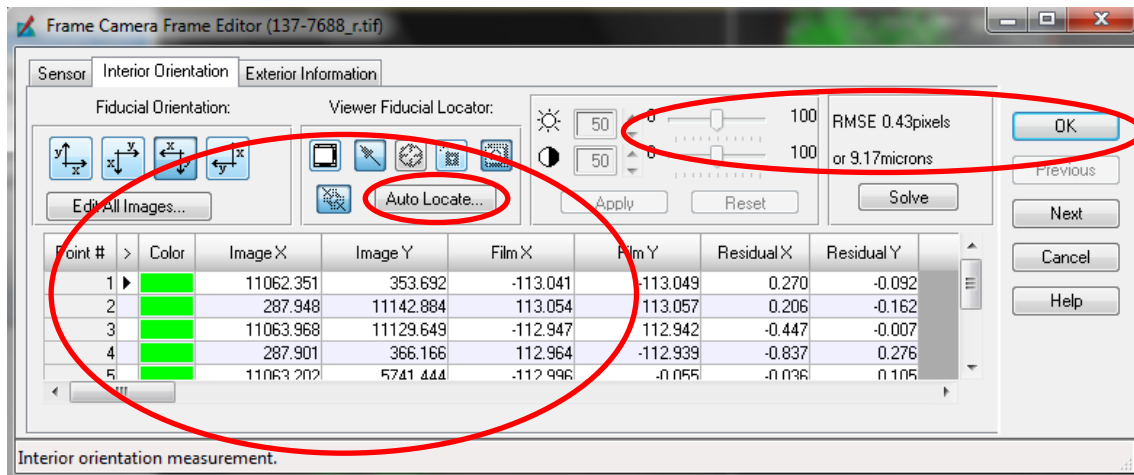


Figura 6.19 - Obtenção da orientação interior de forma automática

Dando continuidade ao processo, são marcados os centros geométricos das oito marcas fiduciais em uma das imagens (Figura 6.20). A partir desse ponto, a orientação das demais pode ser realizada automaticamente. Com os valores das coordenadas das imagens, juntamente com os valores das coordenadas calibradas das marcas fiduciais, foram calculados os resíduos gerados pela diferença entre essas coordenadas. Esses resíduos são importantes indicadores da qualidade da orientação interior.

Ao efetuar as medições das fiduciais na fotografia, a tabela do programa é preenchida com os valores de linha e coluna do píxel correspondente. Os valores X e Y mostrados na tabela correspondem aos valores das marcas fiduciais obtidos no certificado de calibração (Figura 6.20).

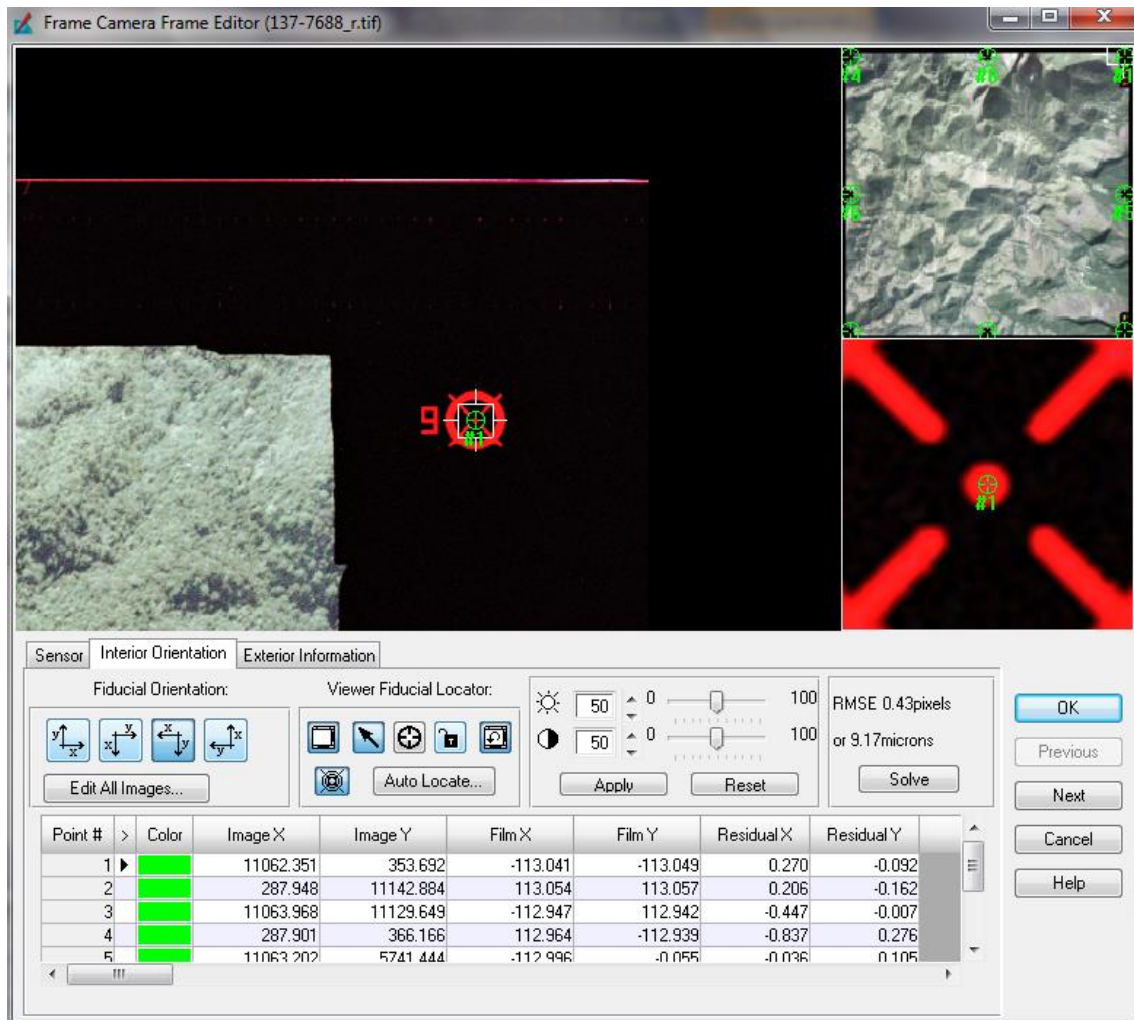


Figura 6.20 - Centro geométrico da marca fiducial e sua tabela correspondente

### 6.6.3. Fototriangulação

Inicialmente, deve-se realizar a inserção de planilha de pontos de apoio de campo com suas coordenadas X, Y e Z (altitude ortométrica) e seus desvios, se disponíveis. Como o objetivo da fototriangulação é utilizar um número reduzido de pontos de controle, há a necessidade de que sejam medidos pontos fotogramétricos, ou seja, pontos medidos apenas em gabinete, sem a necessidade de ir a campo. Através desses pontos, é possível gerar automaticamente uma densa nuvem de pontos de coordenadas conhecidas. Para tal mecanismo, é necessário definir alguns parâmetros de como as imagens a serem utilizadas, as estratégias de busca de píxeis na janela de pesquisa, a distribuição desses pontos, entre outros. A partir dessa massa de pontos composta pelos pontos de controle, fotogramétricos e os calculados automaticamente, pode-se prosseguir ao cálculo da fototriangulação propriamente dita. Nesta, também há a necessidade de se definir alguns parâmetros específicos.

Foram medidos os 6 pontos de apoio de campo (pontos de controle). Esses pontos foram devidamente identificados nas fotografias, com auxílio dos relatórios, e, através das planilhas, foram inseridas suas coordenadas (X, Y e Z) geradas no pós-processamento GPS. Também foram medidos 78 pontos fotogramétricos de acordo com a distribuição de pontos de Grubber, ou seja, próximos aos pontos principais e aos vértices dos quadrados justapostos à linha de base e com lados de comprimento igual ao da base.

Ao final desse processo, foi gerado um relatório contendo os resíduos de cada ponto, permitindo, assim, a análise individual dos erros após o ajustamento dos feixes perspectivos. Esses resíduos podem ser verificados no Apêndice C.

A Figura 6.21 mostra a disposição dos pontos que foram utilizados neste processo, assim como os vetores mostrando graficamente os resíduos nos pontos de controle numa escala ampliada para melhor visualização.

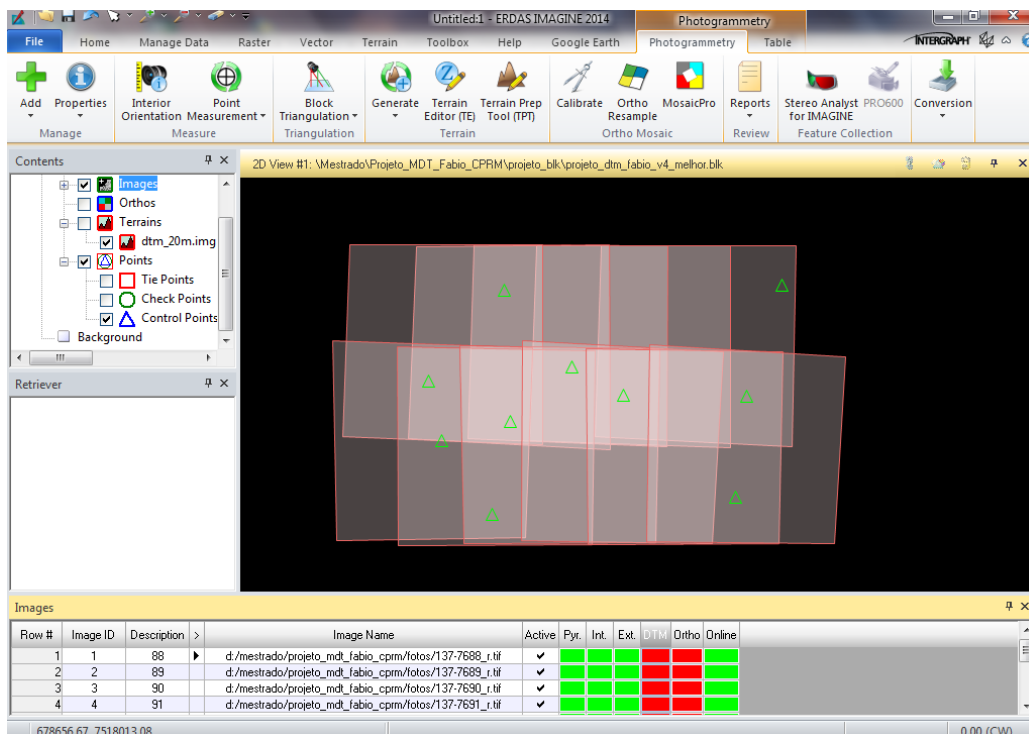


Figura 6.21 - Distribuição dos pontos de controle

O ajuste do bloco fotogramétrico pelo método dos feixes perspectivos se deu quando um conjunto de pontos disponíveis ao cálculo obteve um resultado com número de iterações e convergência métrica e angular (em radianos). O resíduo encontrado após a fototriangulação ficou menor que um (1) (Figura 6.22).



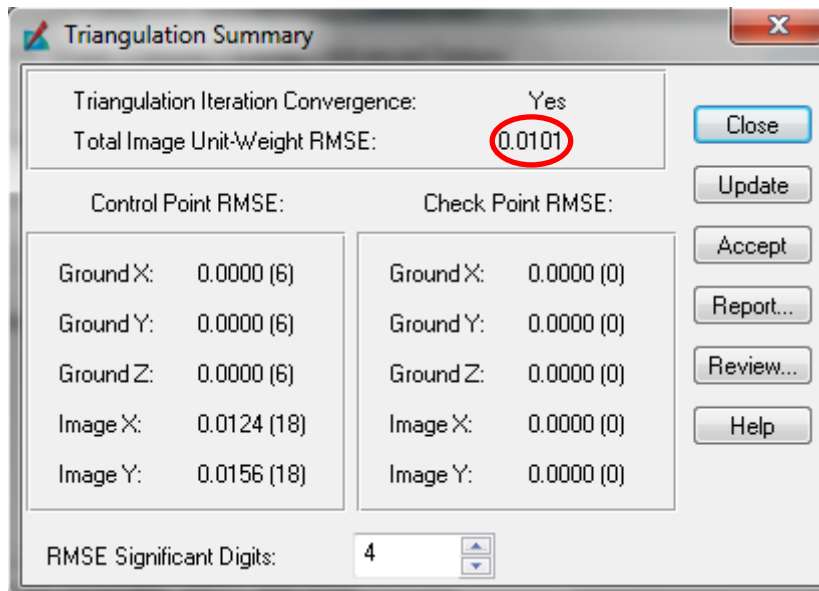


Figura 6.22 - Valor do resíduo encontrado após a fototriangulação

#### 6.6.4. Extração do Modelo Digital de Superfície

Com intuito de promover uma comparação com outros modelos, o modelo digital de superfície foi extraído com valor de espaçamento de 10 metros entre os centros das células para a formação da grade (Figura 6.23).

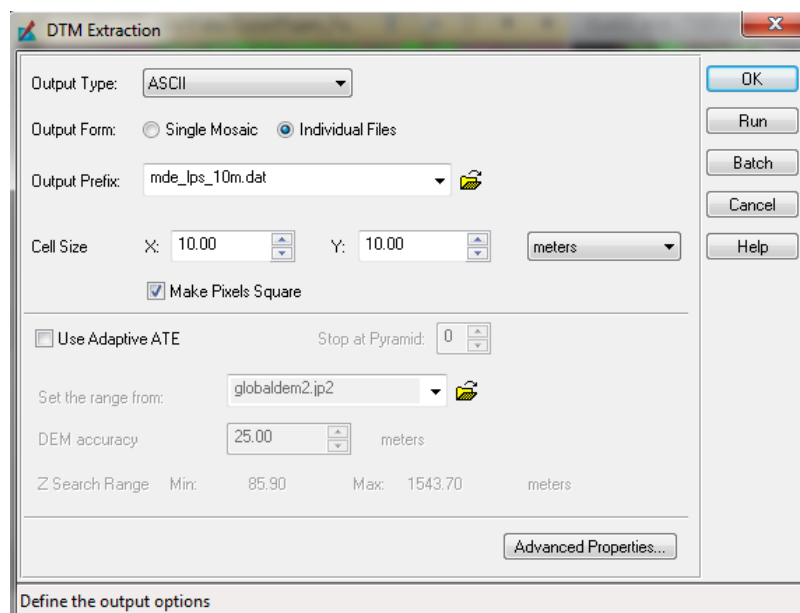


Figura 6.23 - Grade de espaçamento de 10 metros

Foram inseridos dados característicos da área, como, por exemplo, montanhas de elevações altas (Figura 6.24), que, então, permite que se extraiam as características do terreno a partir do MDS.

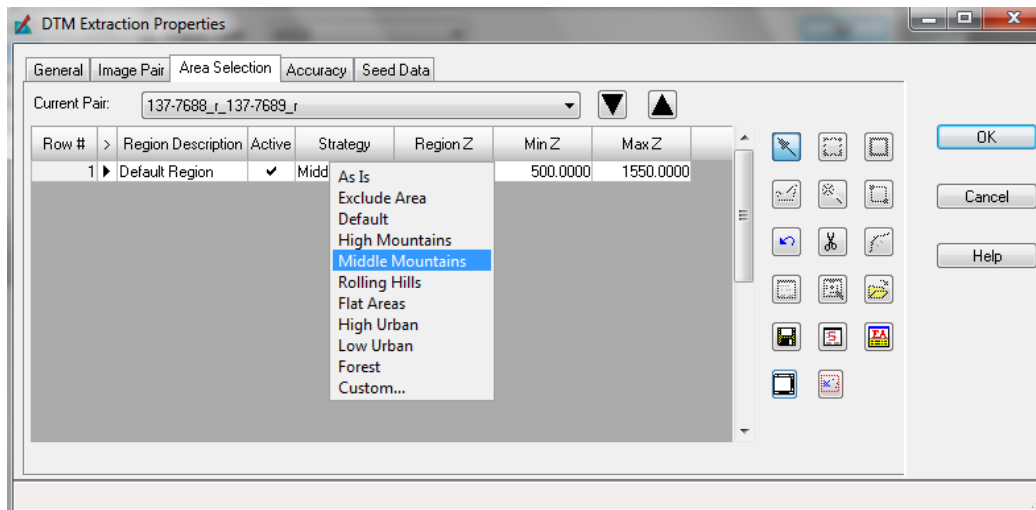


Figura 6.24 - Seleção da estratégia utilizada na extração do MDS

No módulo adicional *automatic terrain extractor* (ATE), foi possível realizar a extração automática do MDS utilizando o método de correlação chamado *least squares matching* (LSM). Esse método realiza a extração densa de correspondências em um par estéreo, resultando em um modelo 3D bem mais próximo do modelo de superfície real.

Ao final do processo, foram gerados dois arquivos contendo as nuvens de pontos com o espaçamento de 10 e 90 metros, e, através do módulo *stereo analyst*, foram exportados em formato *shape* para serem manipulados no ArcGIS.

## 6.7. Extração e Análise dos Modelos Digitais de Superfície no ArcGIS

Para que as análises dos modelos gerados nos programas de fotogrametria E-Foto e LPS fossem realizadas, utilizando os mesmos critérios de avaliação, foram exportadas, para o ArcGIS, as coordenadas tridimensionais das nuvens de pontos que configuram cada modelo extraído automaticamente.

Como o programa E-Foto não é capaz de exportar arquivos no formato *shape*, foi necessária a utilização do programa Excel para que os pontos fossem lidos no formato *pix* e, então, transformados em *xls*, onde foram abertos no ArcGIS e lá finalmente transformados em *shape* (Figura 6.25).

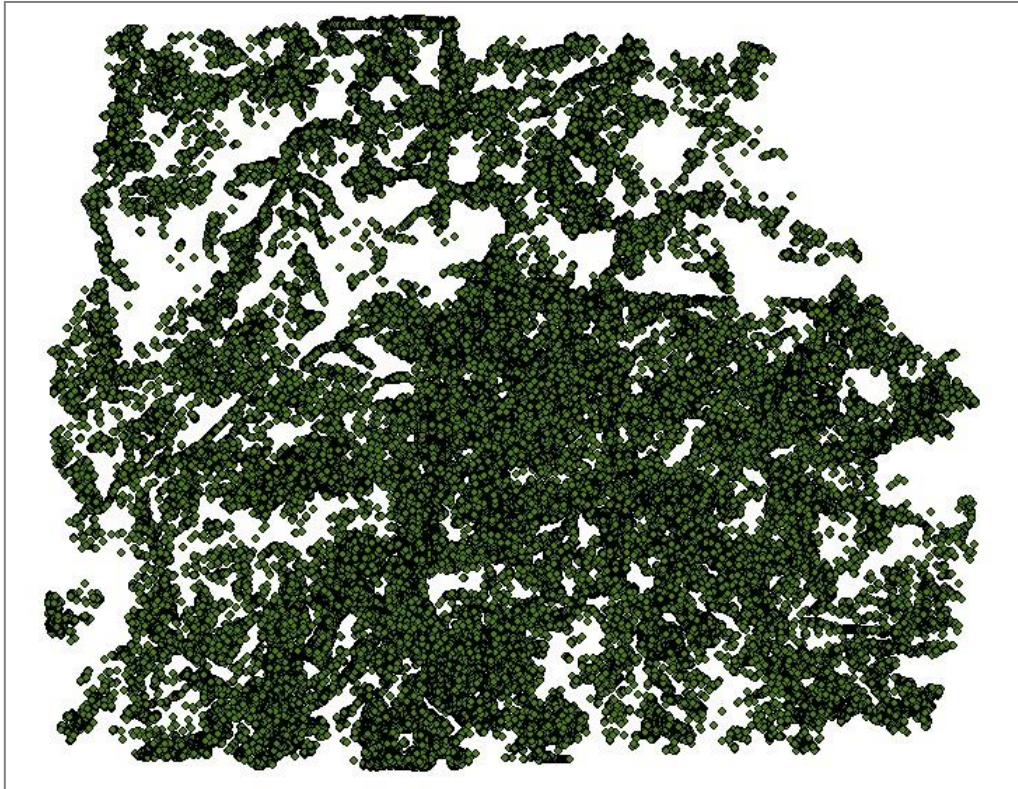


Figura 6.25 - Nuvem de pontos não estruturada transformada em *shape*

A nuvem de pontos gerados pelo E-Foto foi convertida em *shape*, usando a extensão *3D Analyst* para o formato matricial (*raster*), para que se pudesse extrair uma nova nuvem, só que agora com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade e, posteriormente, reamostrada para 90 metros (Figuras 6.26 e 6.27).



Figura 6.26 - Nuvem de pontos estruturada com espaçamento de grade de 10 metros para o E-Foto

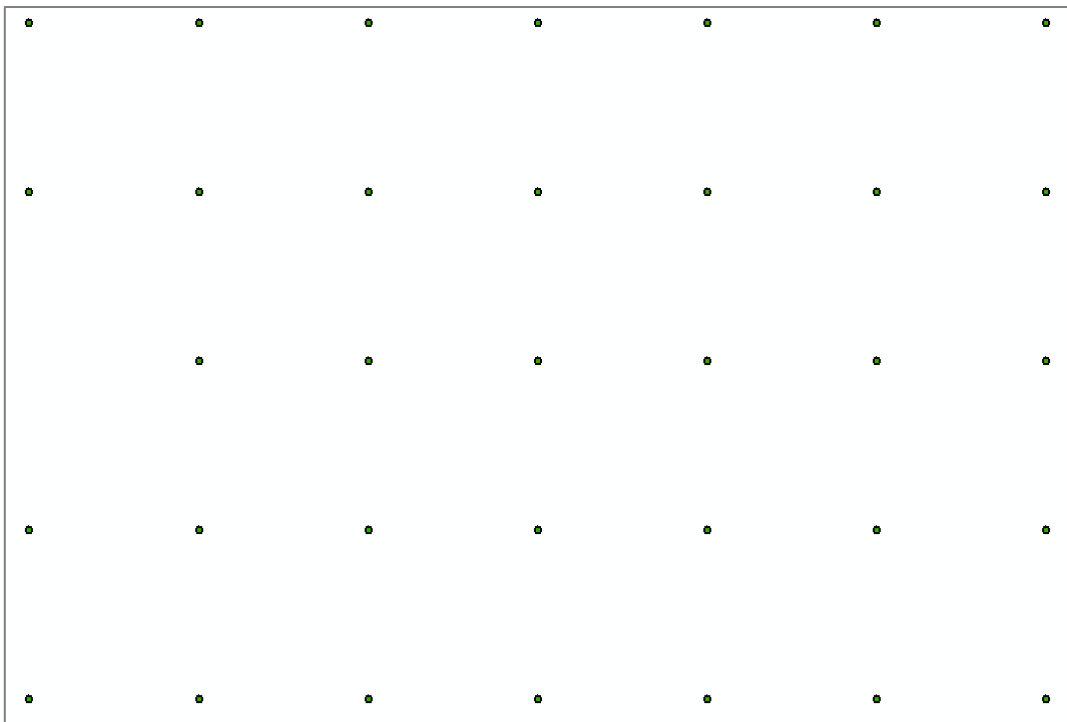


Figura 6.27 - Nuvem de pontos estruturada com espaçamento de grade de 90 metros para o E-Foto

As Figuras 6.28 e 6.29 ilustram as nuvens de pontos importadas do LPS com resoluções de grade nos valores de 10 e 90 metros.

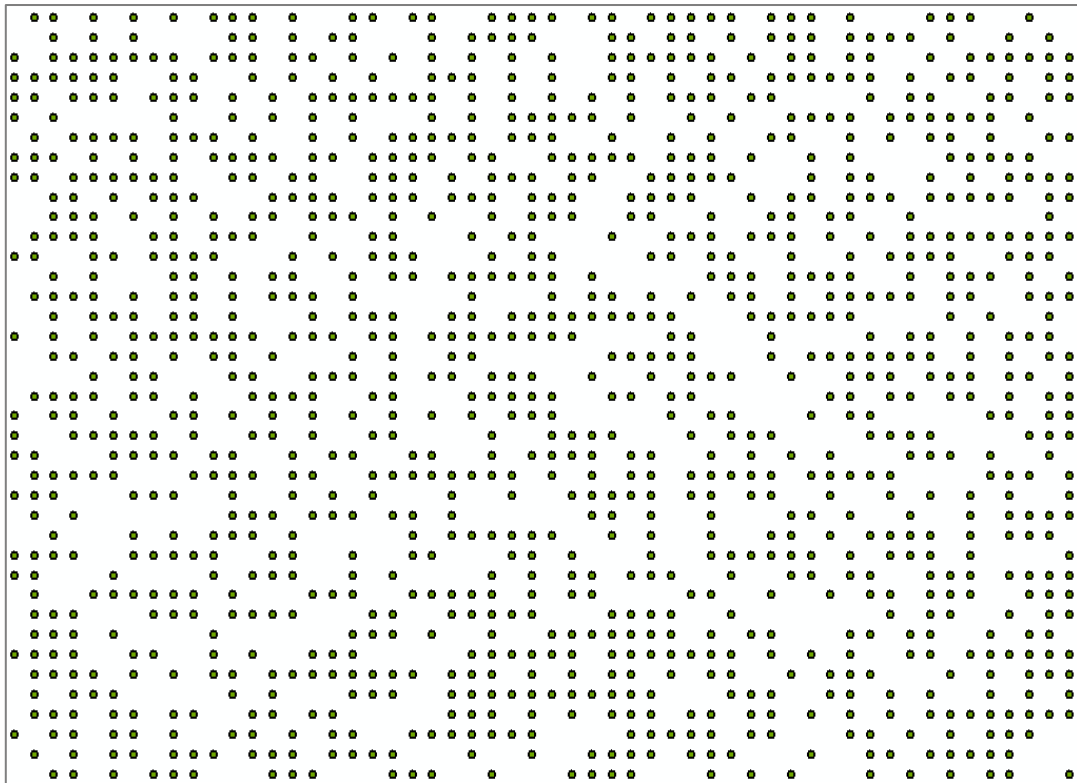


Figura 6.28 - Nuvem de pontos importadas do LPS com espaçamento de grade de 10 metros

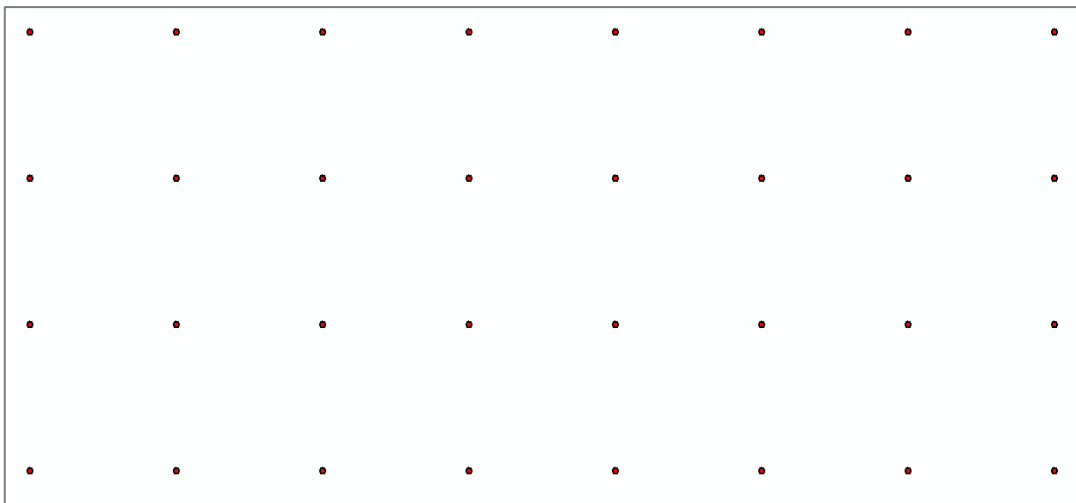


Figura 6.29 - Nuvem de pontos importadas do LPS com espaçamento de grade de 90 metros

Essas ações foram necessárias para que as avaliações do Capítulo 7 fossem desenvolvidas entre os modelos de superfície do E-Foto e LPS, e o do IBGE, utilizado

como modelo de referência. Foram também realizadas comparações dos modelos do E-Foto e LPS com o MDS gerado a partir dos dados da SRTM.

### **6.7.1. Geração do MDS do IBGE**

A geração do modelo digital de superfície por parte do IBGE deu-se através de processamento fotogramétrico analítico e de algoritmos de extração altimétrica por correlação de imagens em processos executados no aplicativo SOCET SET/ATE - *Automatic Terrain Extraction*, versão 4.3. Assim como os modelos gerados pelo E-Foto e LPS, este deu-se de forma automática, apresentando desníveis e descontinuidades. Esse MDS está disponível em formato ASCII ou GEOTIFF para acesso na página da instituição na internet. Porém a amostra original da nuvem de pontos do MDS do IBGE foi gerada com uma resolução de 20 metros.

Como o objetivo dessa dissertação é produzir um modelo digital de superfície o mais próximo possível da realidade do terreno, foi recortada uma área em comum entre o MDS do IBGE e os outros dois modelos (E-FOTO e LPS). Em seguida, gerou-se uma superfície TIN com uma resolução de 10 metros (Figura 6.30), através das curvas de nível restituídas na escala de 1:25.000, cedidas pelo próprio IBGE, e que serviram para as avaliações feitas no Capítulo 7.



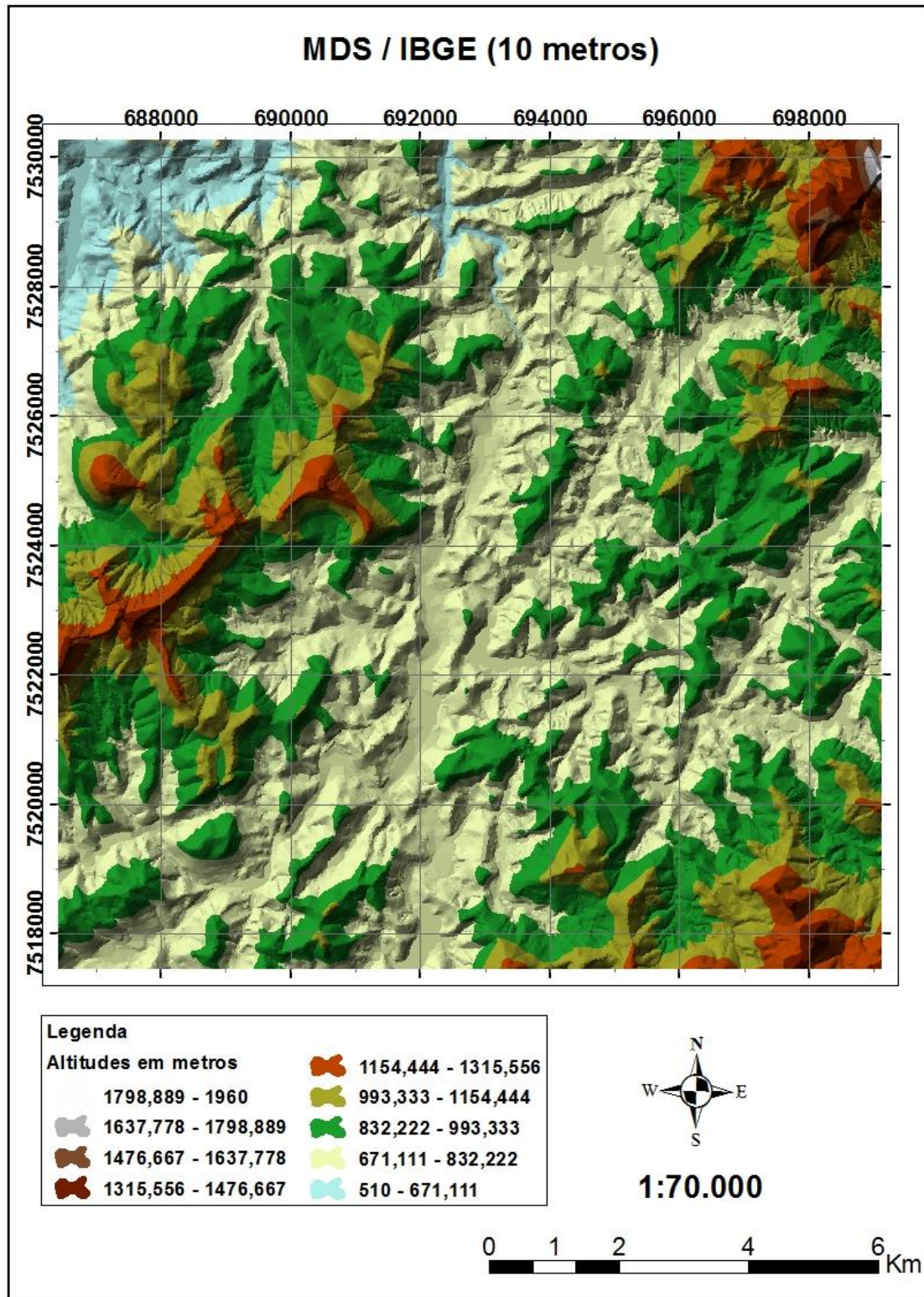


Figura 6.30 - MDS do IBGE com 10 metros de espaçamento de grade

### 6.7.2. Aquisição do MDS da SRTM

A motivação para o desenvolvimento desse tema está no fato de que o modelo topográfico digital da Terra foi processado e está sendo distribuído na resolução

máxima de 30 metros para a região da América do Norte e em uma resolução de 90 metros para a América do Sul. Além da gratuidade, outro ponto a favor dos dados da SRTM é a possibilidade de automatização quase completa no processo de geração do MDS.

Com objetivo de validar o MDS da SRTM, foi recortada uma área em comum entre ele e os outros dois modelos (E-FOTO e LPS), gerando uma superfície TIN com uma resolução de 90 metros (Figura 6.31). Como foi dito no Capítulo 5, a nuvem de pontos da SRTM foi adquirida através do banco de dados da Divisão de Cartografia da CPRM.



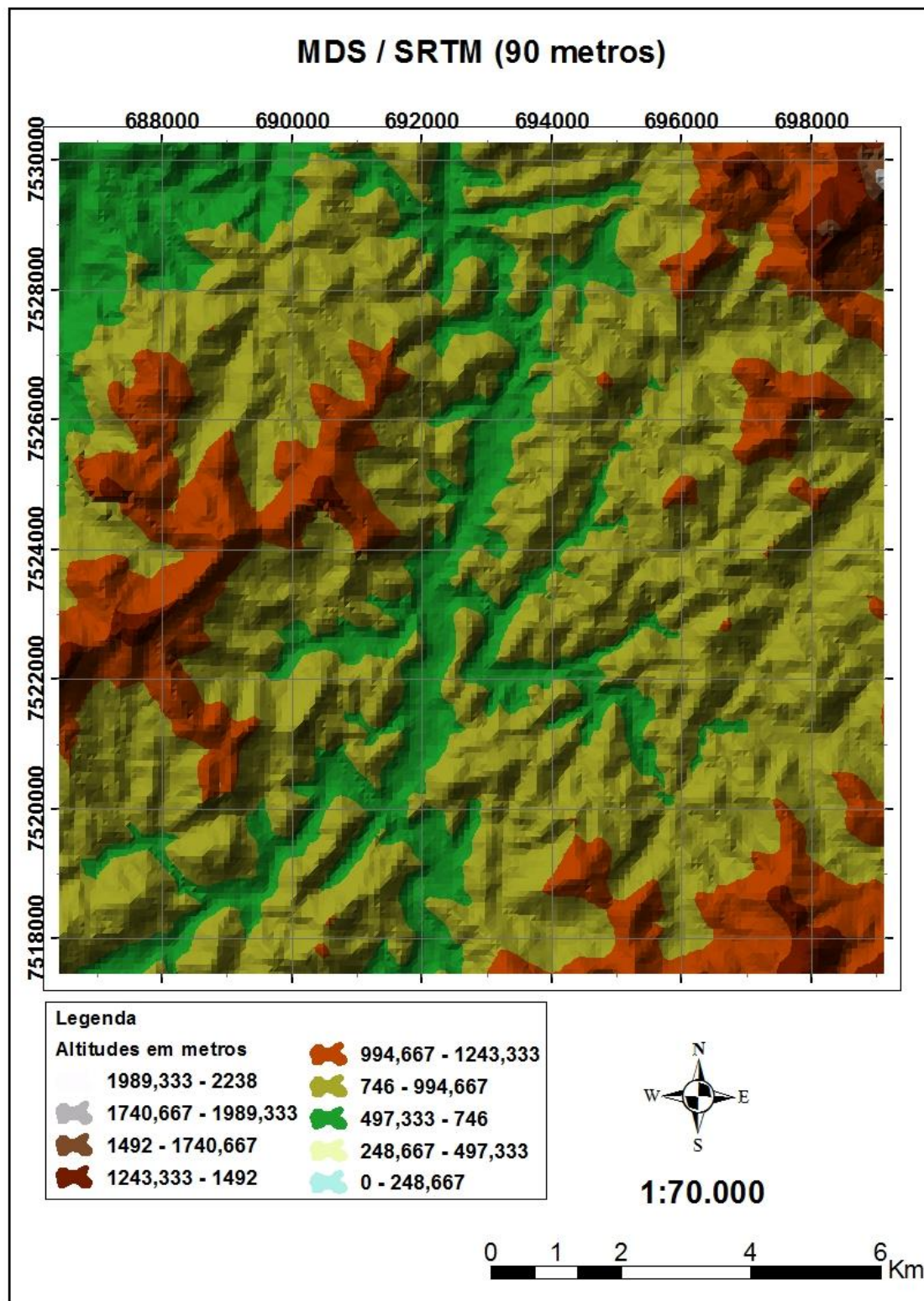


Figura 6.31 - MDS da SRTM com 90 metros de espaçamento de grade

Como o valor de resolução do MDS da SRTM é de 90 metros (Figura 6.31), foi extraída pelo LPS uma nuvem de pontos estruturada com 90 metros entre os pontos da

grade. Para o E-Foto, o mesmo procedimento relatado anteriormente para 10 metros foi executado com resolução de 90 metros para as devidas comparações.

É importante ressaltar que a diminuição da densidade da nuvem de pontos é uma ação que não necessariamente altera a qualidade dos dados, mas apenas sua resolução, possibilitando a comparação entre diferentes dados e a análise dos resultados que os programas E-Foto e LPS geraram automaticamente.

Um fato relevante deste trabalho é que todos os MDS, com exceção da SRTM, foram gerados a partir do mesmo grupo de imagens aerofotogramétricas.

Foi utilizada a ferramenta *3D Analyst Tools* para transformar cada nuvem de pontos em um TIN, o que permitiu criar uma representação contínua das superfícies. Todos os modelos extraídos dos programas fotogramétricos passaram por análises visuais e numéricas.

A escolha do TIN permitiu que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo e drenagem, fossem consideradas durante a geração da grade, o que possibilitou a modelagem do terreno preservando as feições geomórficas da superfície.

As Figuras, 6.32, 6.33, 6.34 e 6.35 ilustram os modelos TIN do E-Foto e do LPS com os espaçamentos de grade de 10 e 90 metros.

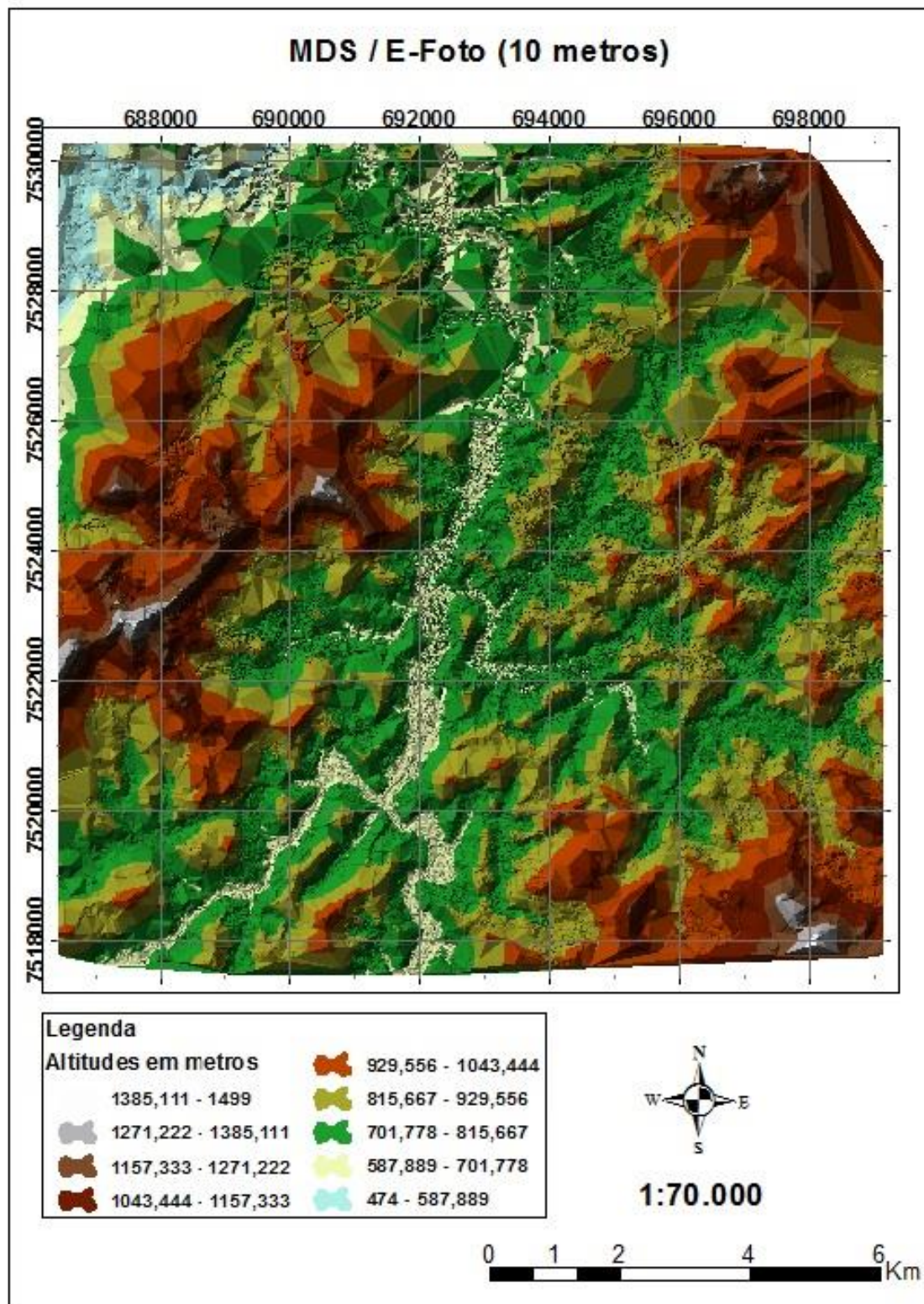


Figura 6.32 - MDS do E-Foto com 10 metros de espaçamento de grade



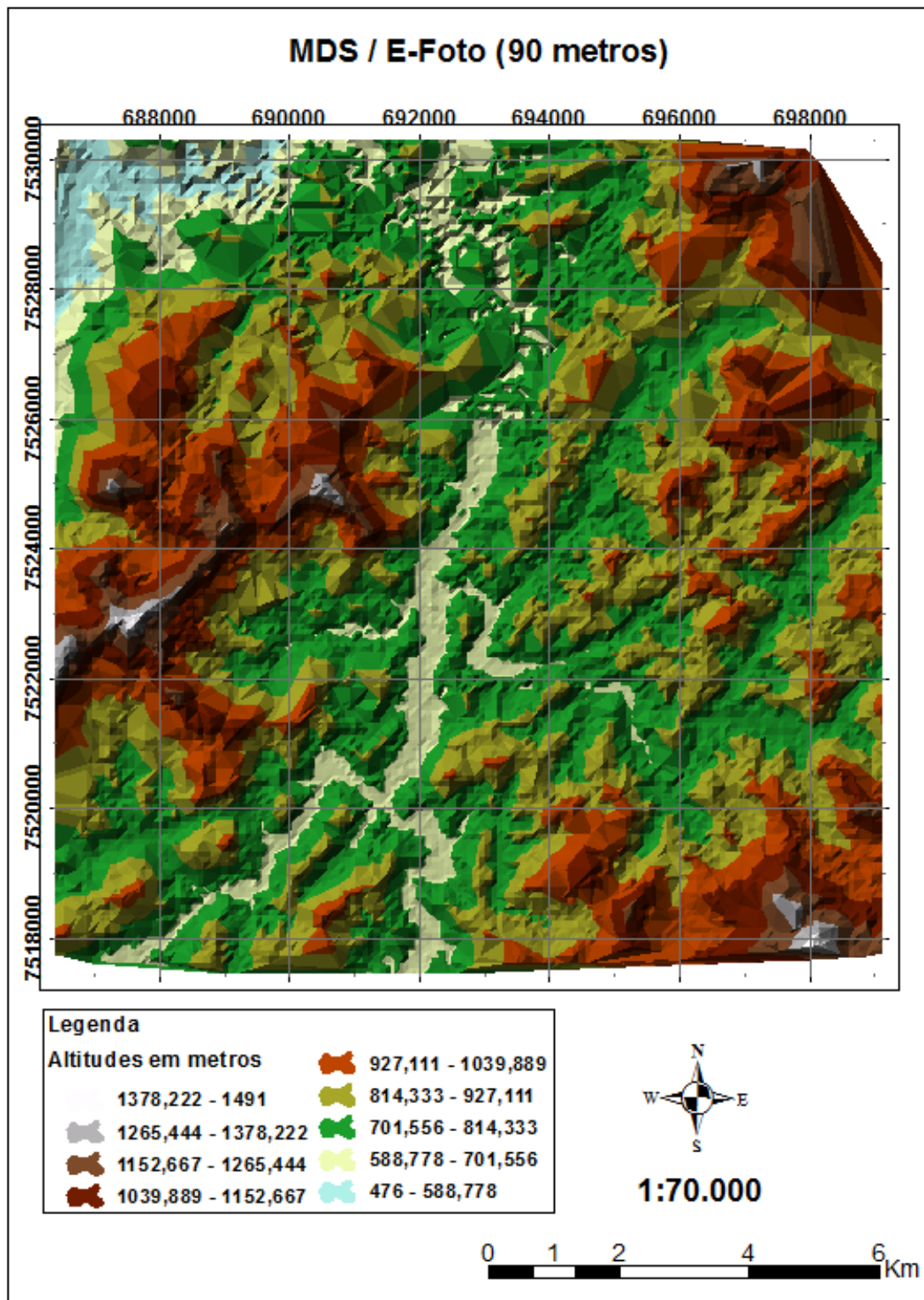


Figura 6.33 - MDS do E-Foto com 90 metros de espaçamento de grade

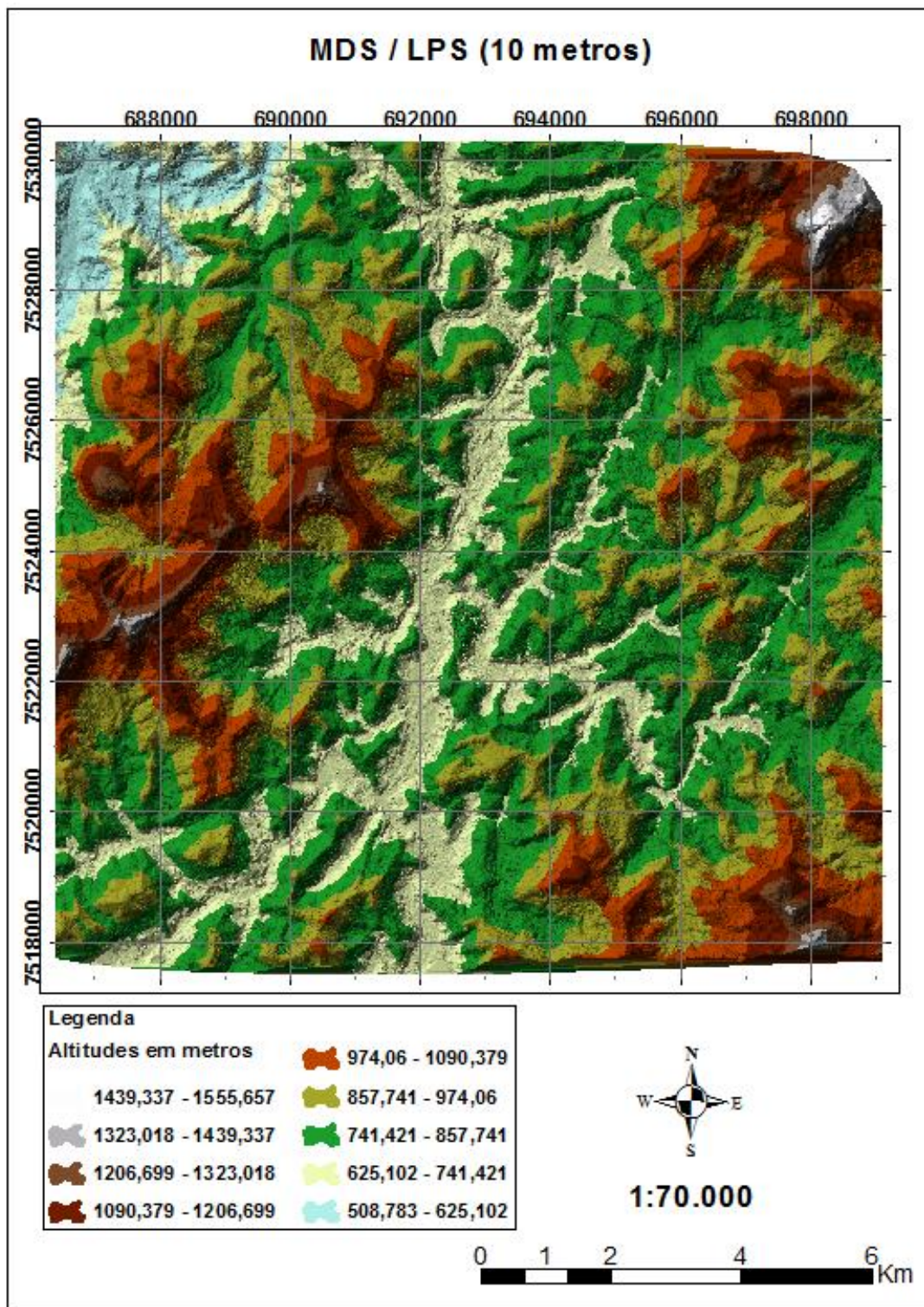


Figura 6.34 - MDS do LPS com 10 metros de espaçamento de grade



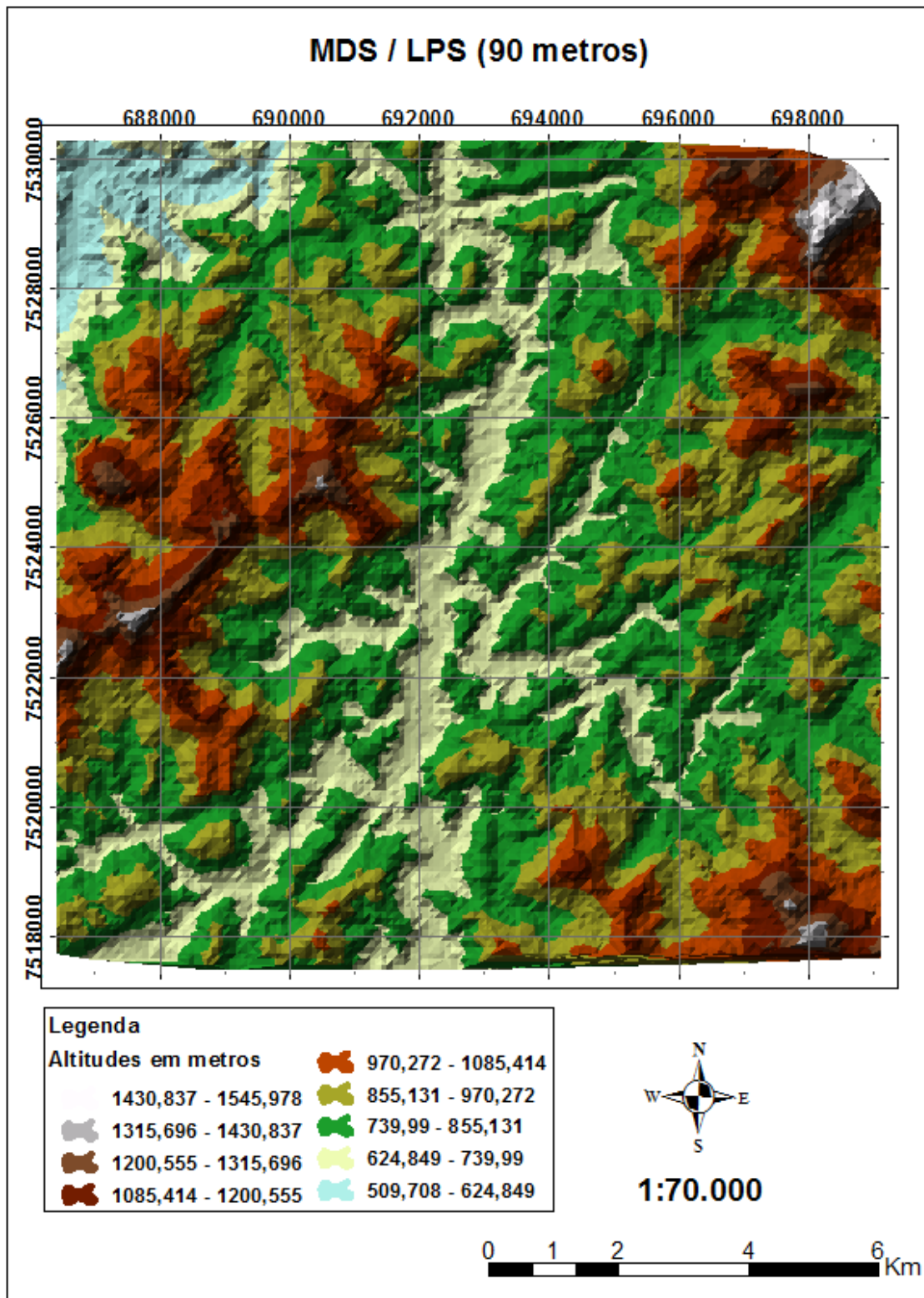


Figura 6.35 - MDS do LPS com 90 metros de espaçamento de grade

Antes das avaliações dos modelos digitais extraídos por fotogrametria, foi mostrada a qualidade do MDS do IBGE. O modelo foi submetido a uma análise numérica, que se baseou na comparação altimétrica dos pontos coletados em campo, os

quais representam o que se considerou como verdade ou referência do terreno, com os seus homólogos estimados na superfície do modelo digital de superfície. O erro altimétrico na área de estudo, segundo o próprio IBGE, pode variar, em média, 5 metros.

Para essa análise da qualidade, foram utilizados os pontos de campo do próprio IBGE e CPRM (Item 5.1.1), que foram levantados com GPS geodésico.

Através do endereço eletrônico da instituição na internet: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br), foram baixados os relatórios contendo informações relevantes das referências de nível (RRNN) do IBGE: 1003T, 1003U, 1003V, 1003X, 1003Z, 1004A, 1004B, 1004C, 1004D, 1014D e 1014F, todas compreendidas na área de estudo, além da estação GPS SAT-91870 e do vértice de triangulação VT-584, ponto culminante da região. Todos os relatórios citados encontram-se no Anexo C.

A análise visual foi iniciada inserindo-se a base cartográfica cedida pelo IBGE na escala de 1:25.000 nos modelos gerados, primeiramente pelo E-Foto e posteriormente pelo LPS. Essa base consiste em curvas de nível interpoladas a partir do MDS do IBGE, além da rede de drenagem e do sistema de transportes. Com essa análise, foi possível visualizar o comportamento global das curvas de nível interpoladas e da rede de drenagem nos modelos, permitindo uma análise qualitativa do contexto da representação.

Para o início da análise numérica, foi utilizada a metodologia descrita no parágrafo abaixo para as seis superfícies geradas, que são as do IBGE, E-Foto e LPS, todas com 10 metros de resolução, e SRTM, E-Foto e LPS com 90 metros.

De posse dessas superfícies, e com o objetivo de subtraí-las, os modelos foram transformados para o formato matricial (*raster*), em um arranjo de pontos regularmente espaçados de 10 e 90 metros (Figuras 6.36, 6.37, 6.38, 6.39, 6.40 e 6.41), mantendo as suas características resolutivas, por meio da ferramenta *conversion tools*. Com os arquivos no formato matricial, foi possível realizar a subtração das superfícies para análise do resultado encontrado utilizando a ferramenta *raster calculator*. Com a subtração realizada, foram obtidos os valores da diferença entre as superfícies e, por meio desta, a reclassificação com a ferramenta *reclassify*, de modo a subdividir as

diferenças entre as superfícies em intervalos e poder assim quantificar e qualificar os erros em termos de área de forma mais simplificada.

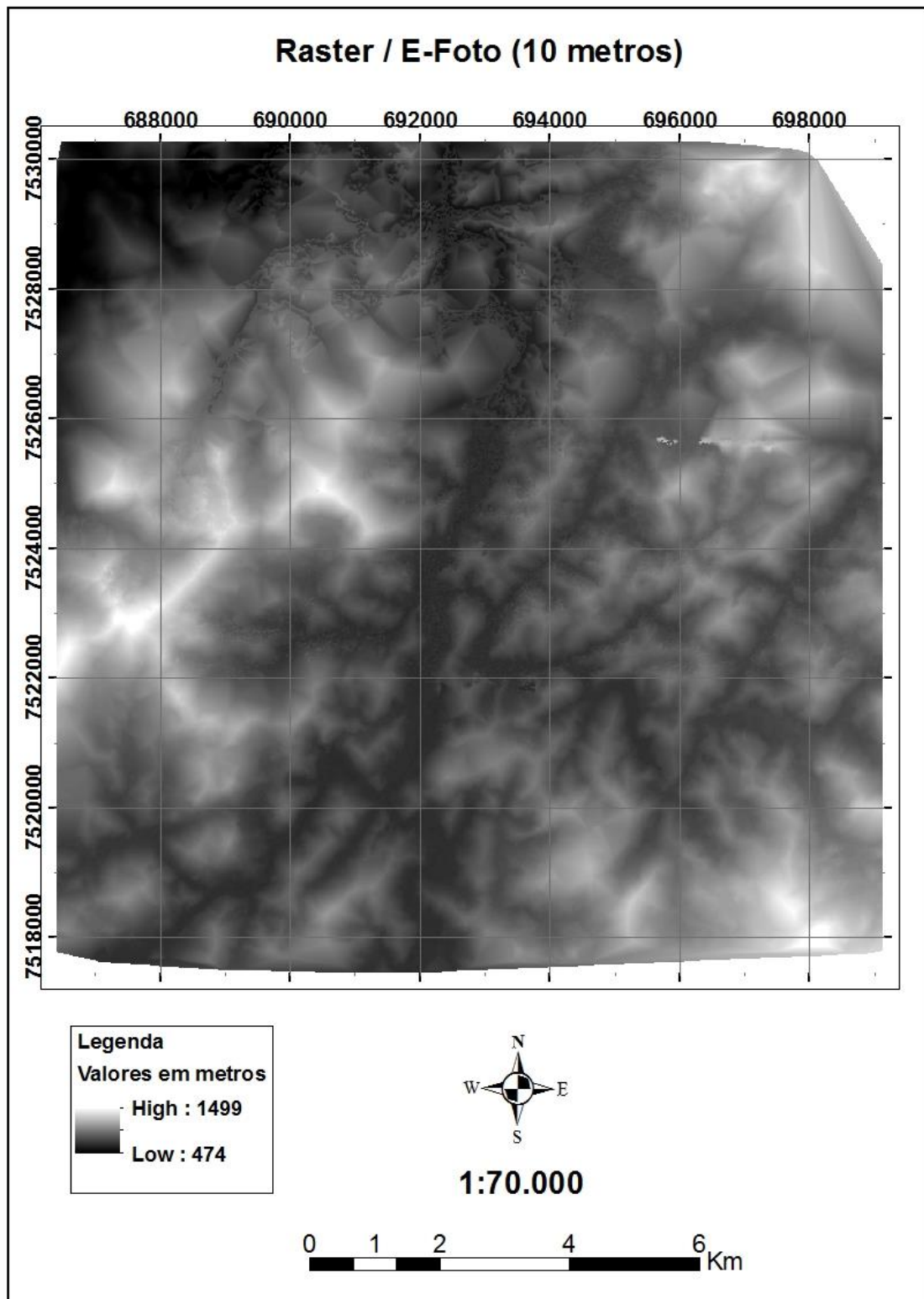


Figura 6.36 - Matriz (*raster*) do E-Foto com 10 metros de espaçamento de grade



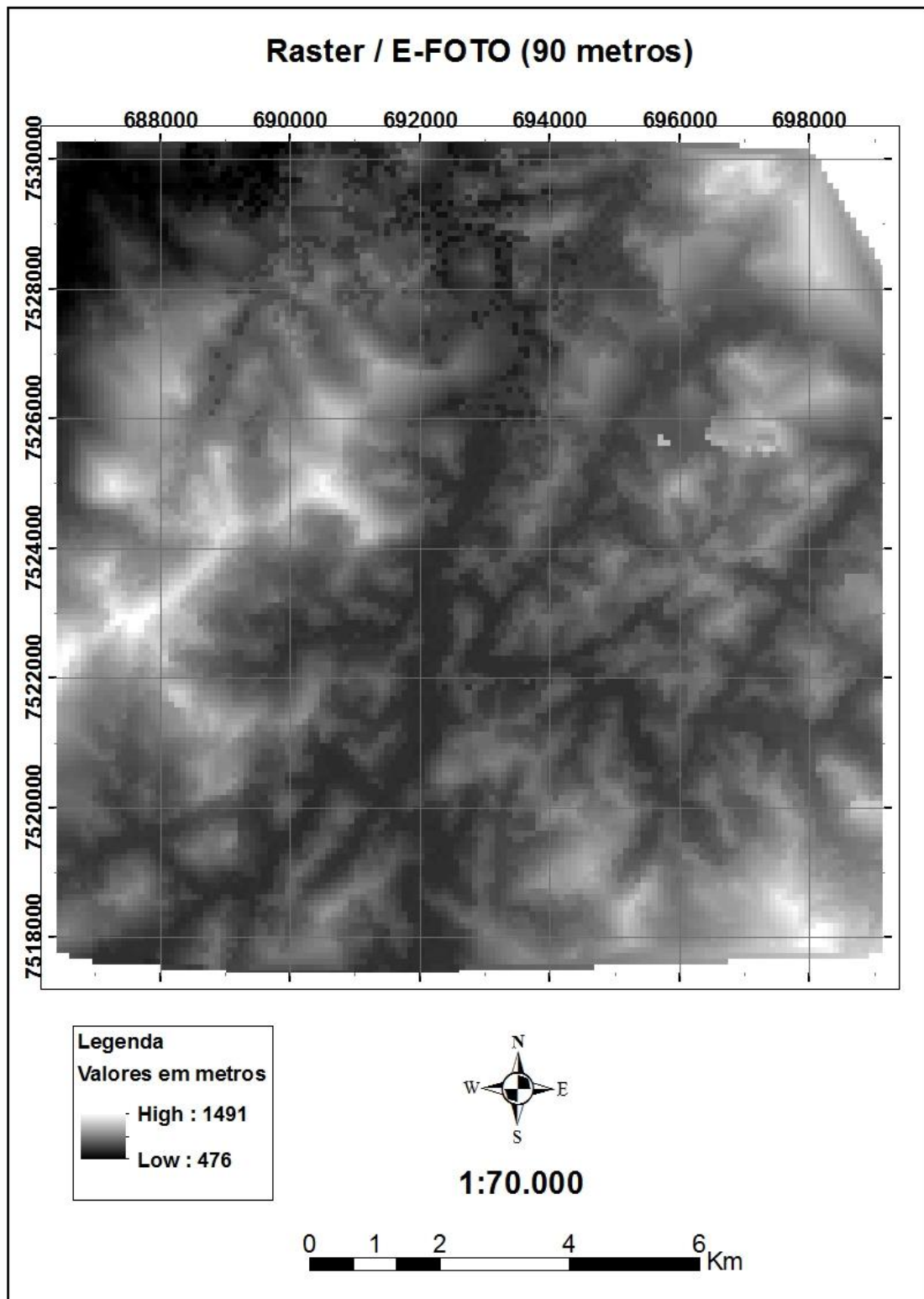


Figura 6.37 - Matriz (*raster*) do E-Foto com 90 metros de espaçamento de grade

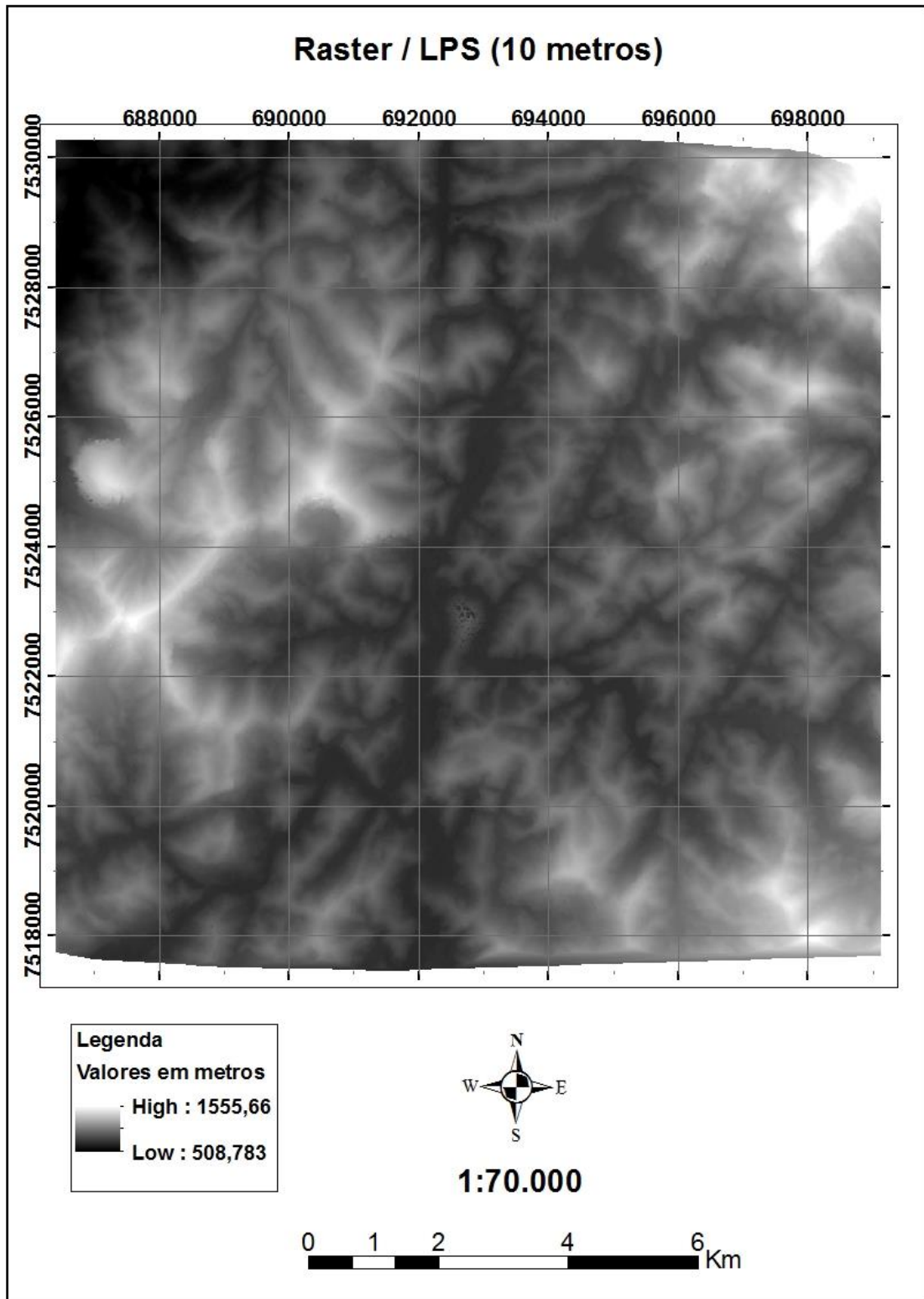


Figura 6.38 - Matriz (*raster*) do LPS com 10 metros de espaçamento de grade

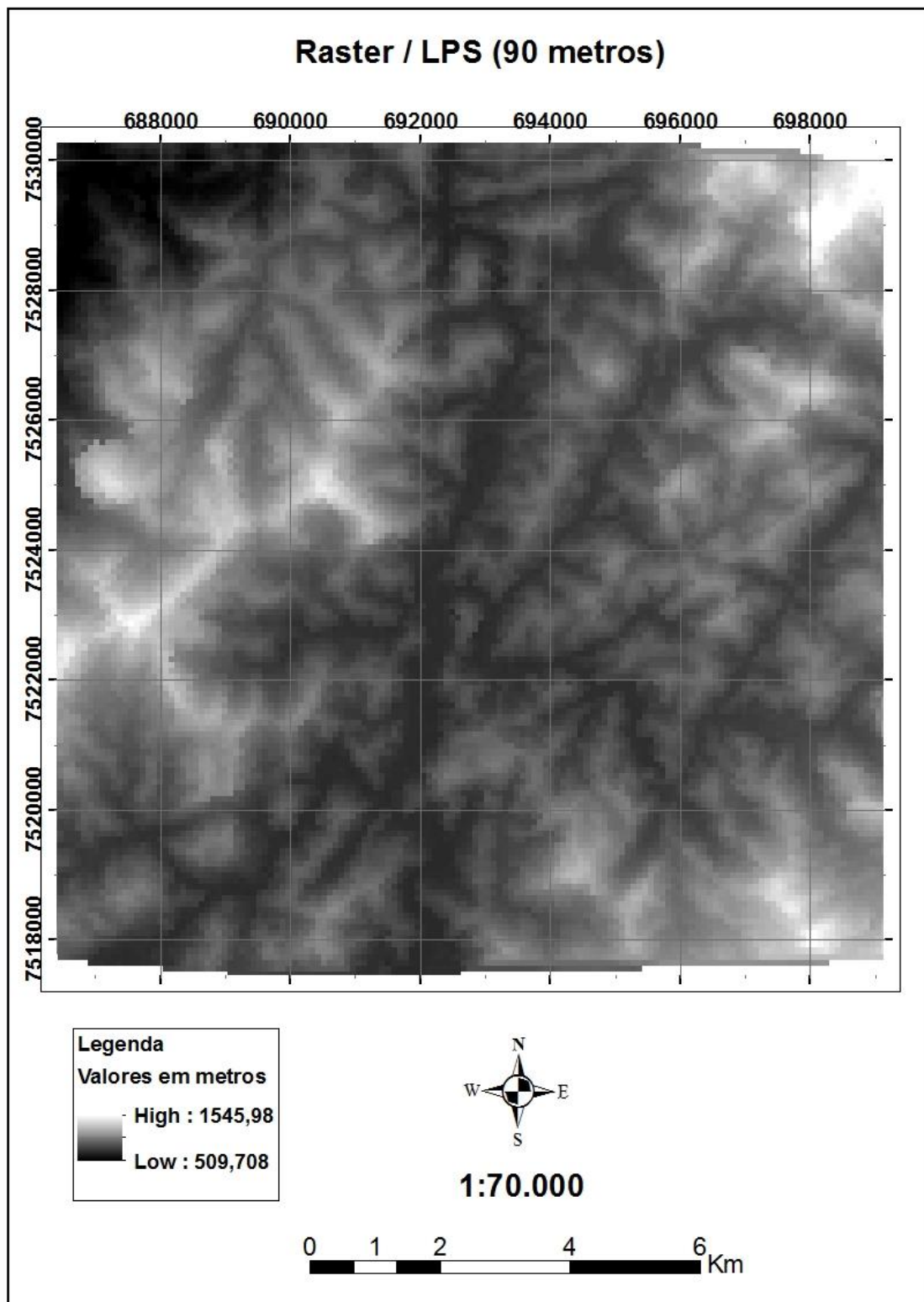


Figura 6.39 - Matriz (*raster*) do LPS com 90 metros de espaçamento de grade

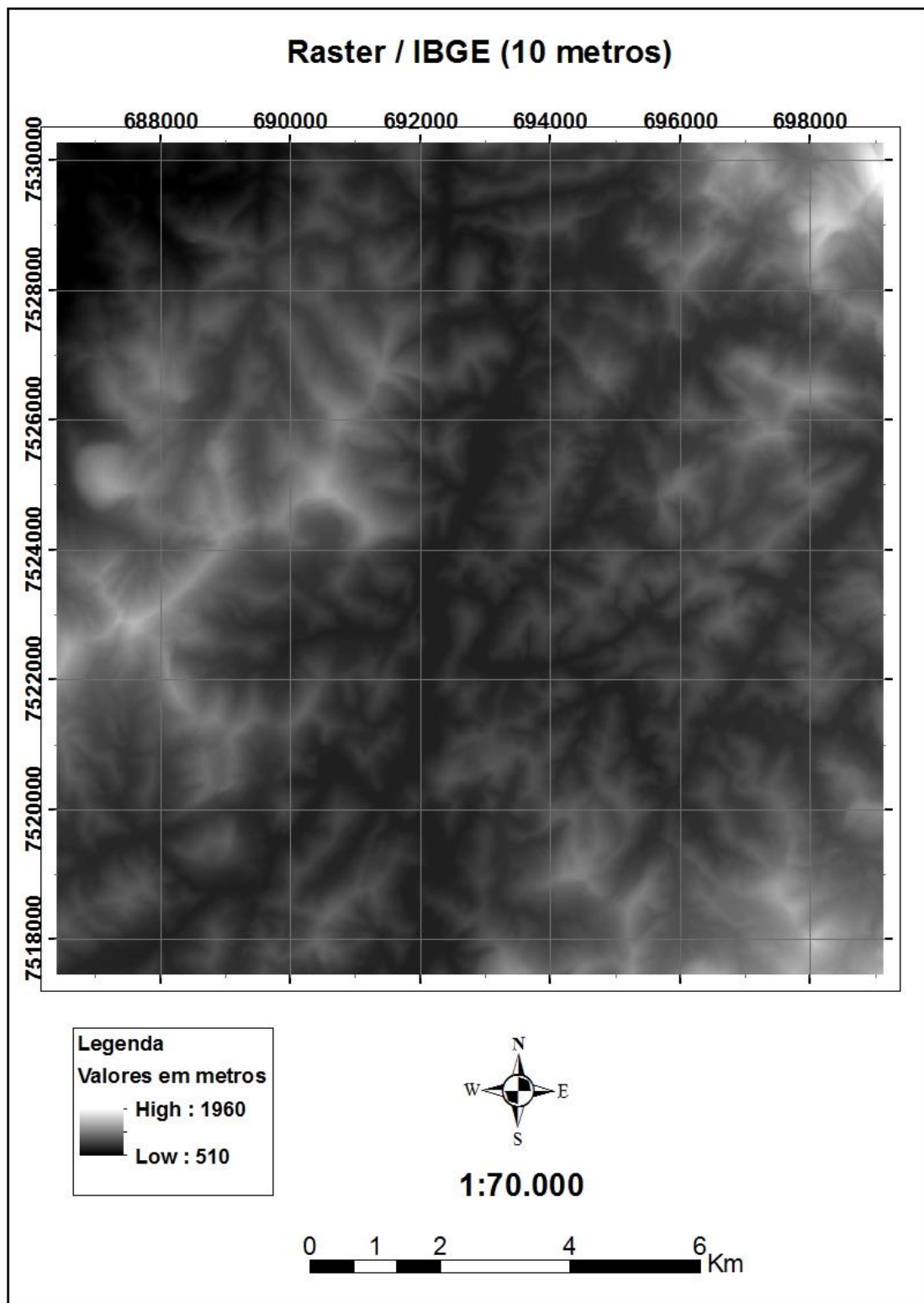


Figura 6.40 - Matriz (*raster*) do IBGE com 10 metros de espaçamento de grade

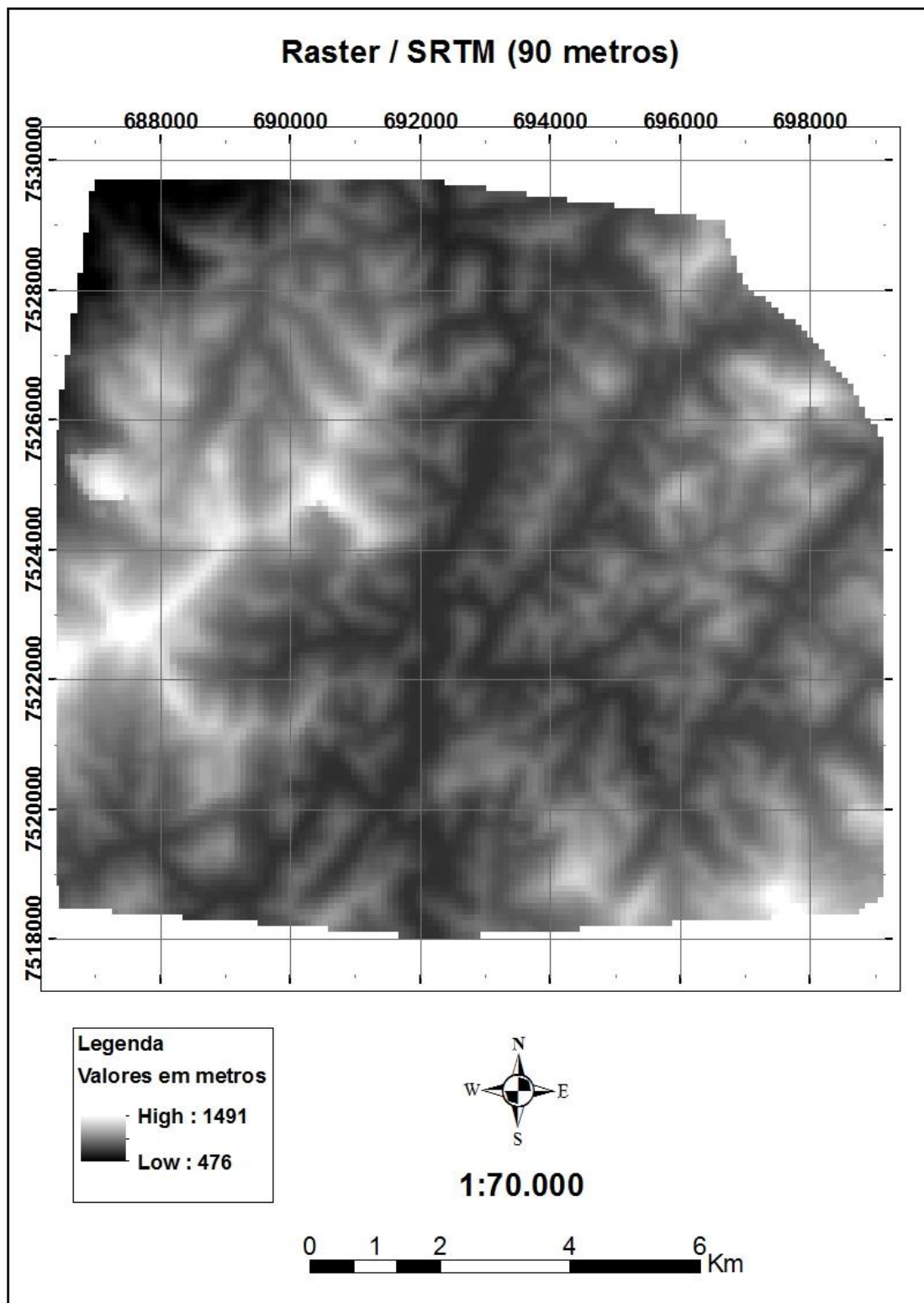


Figura 6.41 - Matriz (*raster*) da SRTM com 90 metros de espaçamento de grade

As subtrações foram feitas primeiramente entre as superfícies matriciais (*raster*) do E-Foto e do IBGE, e, posteriormente, entre as superfícies do LPS e IBGE. Por fim, entre E-Foto e LPS, lembrando que todos os modelos utilizados nesse processo

possuíam resoluções de 10 metros. O procedimento foi repetido entre as superfícies matriciais (*raster*) do E-Foto e SRTM, além da SRTM e LPS, para a resolução de 90 metros.

Através dos mapas de diferenças, gerados a partir da reclassificação, foi possível realizar as primeiras análises com os cálculos dos percentuais de área correspondentes a determinados intervalos de erros altimétricos.

Outra análise realizada foi a comparação dos modelos gerados com os pontos de campo (PC), com as referências de níveis (RRNN) da região, com a estação SAT GPS (SAT) e com o vértice de triangulação (VT).

A utilização desses dados originou duas tabelas (Apêndice A) com as diferenças entre os pontos de campo coletados com GPS geodésico e as coordenadas altimétricas obtidas através dos nivelamentos geométrico e trigonométrico realizados pelo IBGE, com o valor encontrado na geração dos modelos de 10 e 90 metros de espaçamento.

Como estratégia de cálculo os valores das RRNN, da SAT e do VT, foram colocados no mesmo grupo, tendo sido denominados genericamente de “RRNN”. Observa-se que suas respectivas coordenadas foram retiradas dos relatórios do IBGE. Em outro grupo, ficaram os pontos de campo que, na realidade, são os pontos de controle que não foram utilizados no processo fotogramétrico.

Finalmente, diversas comparações puderam ser executadas entre os modelos, e, assim, foi possível obter uma estimativa do percentual dos melhores e piores resultados dentro da área de interesse. As análises e resultados serão apresentados no Capítulo 7.

No Capítulo 8, os modelos gerados foram submetidos às aplicações hidrológicas, utilizando o MDS do E-Foto e do LPS com 10 metros de resolução para a geração dos mapas hipsométricos, de declividade, de aspecto e de curvatura, além da delimitação de bacias na área de interesse fazendo uso dos modelos da SRTM, E-Foto e LPS com 90 metros.



## CAPÍTULO 7 - AVALIAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE

Este capítulo trata da avaliação dos MDS gerados no Capítulo 6, onde foi conduzido o processamento dos dados para a bacia do rio Piabanha. Mas antes das avaliações dos modelos gerados, foi demonstrada a qualidade do MDS do IBGE.

### 7.1. Demonstração da qualidade do MDS do IBGE

A análise numérica da qualidade do MDS do IBGE apontou que, tal como o esperado, quando comparado com os pontos de campo com coordenadas conhecidas, o modelo mostrou-se em boas condições e pode servir de referência para a avaliação dos modelos extraídos pelo E-Foto e LPS.

Como estratégia de cálculo, foram determinados os intervalos de confiança de 99,99% sobre as diferenças altimétricas entre os pontos de campo e os seus homólogos no MDS do IBGE, com o objetivo de eliminar da distribuição os erros grosseiros e, a partir desse referencial, obter a média e o desvio padrão dos erros altimétricos.

A Tabela 7.1 mostra a média aritmética ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão (s) para as diferenças altimétricas do modelo em relação aos pontos de campo utilizados para o cálculo.

Tabela 7.1 - Erros altimétricos do modelo do IBGE com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m)

	Média e Desvio Padrão dos erros altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
MDS (10 m)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>IBGE</b>	<b>8,20</b>	<b>5,25</b>	<b>3,30</b>	<b>3,35</b>

Analisando o resultado da tabela acima, nota-se que o MDS do IBGE obteve bons resultados em relação aos pontos de campo, uma vez que o erro altimétrico esperado para esta região é de 5 metros, devido às suas características.

Por outro lado, observa-se que as diferenças em relação às RRNN apresentaram valores superiores a 5 metros. Uma razão para essa diferença pode ter sido o fato de que a área possui uma grande variação de altitude, o que pode ter acarretado diferenças altimétricas consideráveis em terrenos fortemente acidentados. Outro aspecto vem do tipo de técnica utilizada para a obtenção das coordenadas altimétricas. As RRNN foram

obtidas por nivelamento geométrico e diretamente referidas ao geóide, enquanto que os seus homólogos no MDS foram adquiridos por extração automática, baseados em pontos de controle provenientes de levantamentos GPS, que exigem a interpolação dos respectivos desníveis geodais, fato que pode vir a explicar as diferenças encontradas.

Trata-se do problema de referir as altitudes geométricas (elipsoidais), obtidas através das técnicas de GNSS, aos sistemas verticais existentes, materializados por conjuntos de altitudes com características físicas (doravante denominadas simplesmente altitudes físicas) e formalmente referidas ao geóide. Na prática, essa última caracterização é questionável para a grande maioria dos sistemas de altitudes, realizados sem o concurso de informações gravimétricas (FREITAS e LUZ, 1995; FREITAS e BLITZKOW, 1999; DREWES *et al.*, 2002b). Segundo GEMAEL (1999), em muitos deles, sequer foi aplicada a redução pseudo-ortométrica, denominação mais adequada para a tradicional correção ortométrica, que trata apenas do efeito do não paralelismo das superfícies equipotenciais do campo da gravidade normal.

Como informado no Capítulo 6, os resultados obtidos dos modelos extraídos dos programas fotogramétricos (E-Foto e LPS) foram objeto das análises gráfica e numérica.

## **7.2. Comparação entre os MDS do E-Foto e do IBGE**

Com essa comparação, espera-se ter uma estimativa do percentual da região de estudo que teve os melhores e piores resultados na comparação IBGE e E-Foto.

### **7.2.1. Análises Visual e Numérica**

A análise visual mostrou que, quando inserida a base cartográfica na escala de 1:25.000 cedida pelo IBGE, como a rede de drenagem e as curvas de nível no modelo do E-Foto, foram percebidas algumas falhas na área de estudo, indicadas na Figura 7.1, principalmente nas regiões de altitudes mais baixas do MDS. A Figura 7.1 mostra o MDS gerado a partir dos dados do E-Foto com 10 metros de resolução e utilizado para comparação visual.



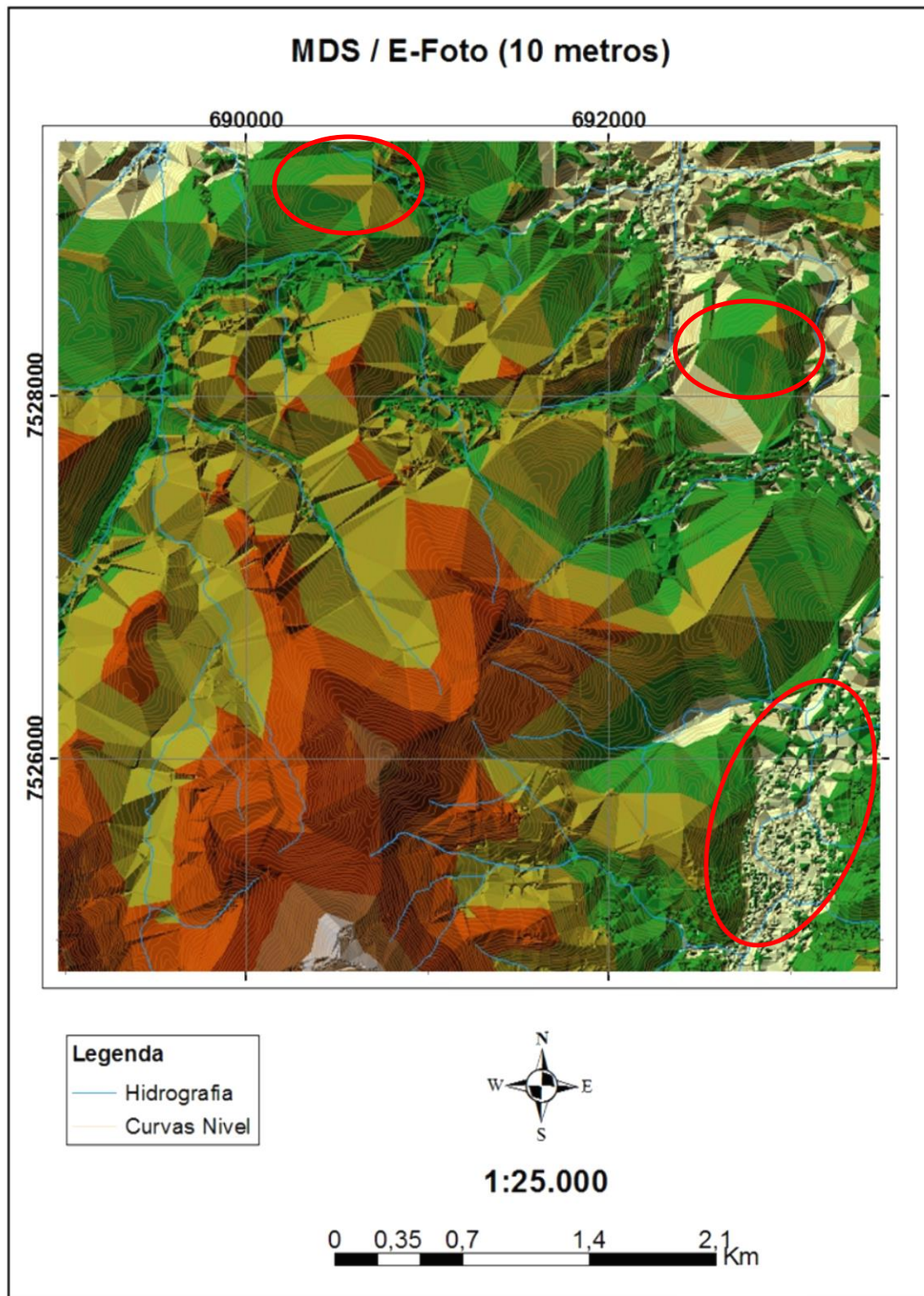


Figura 7.1 - Análise visual do MDS extraído do E-Foto

Com a subtração entre as duas superfícies, sendo MDS do IBGE menos MDS do E-Foto, verificou-se uma variação dos valores altimétricos. Ao sul do bloco fotogramétrico, as diferenças tiveram, em sua maioria, valores entre 0 e 15 metros.

Entretanto, na parte mais ao norte do bloco fotogramétrico, diferenças maiores foram encontradas, mas em quantidade pequena em relação à área. Foi obtido também o mapa das diferenças entre os dois modelos, dividindo os erros altimétricos em intervalos não regulares, de forma que, com o menor número de classes, fosse obtida uma representação clara dos resultados a que se chegou. Com esse procedimento, foi possível obter as análises visual e numérica, como mostram a Figura 7.2 e a Tabela 7.2.

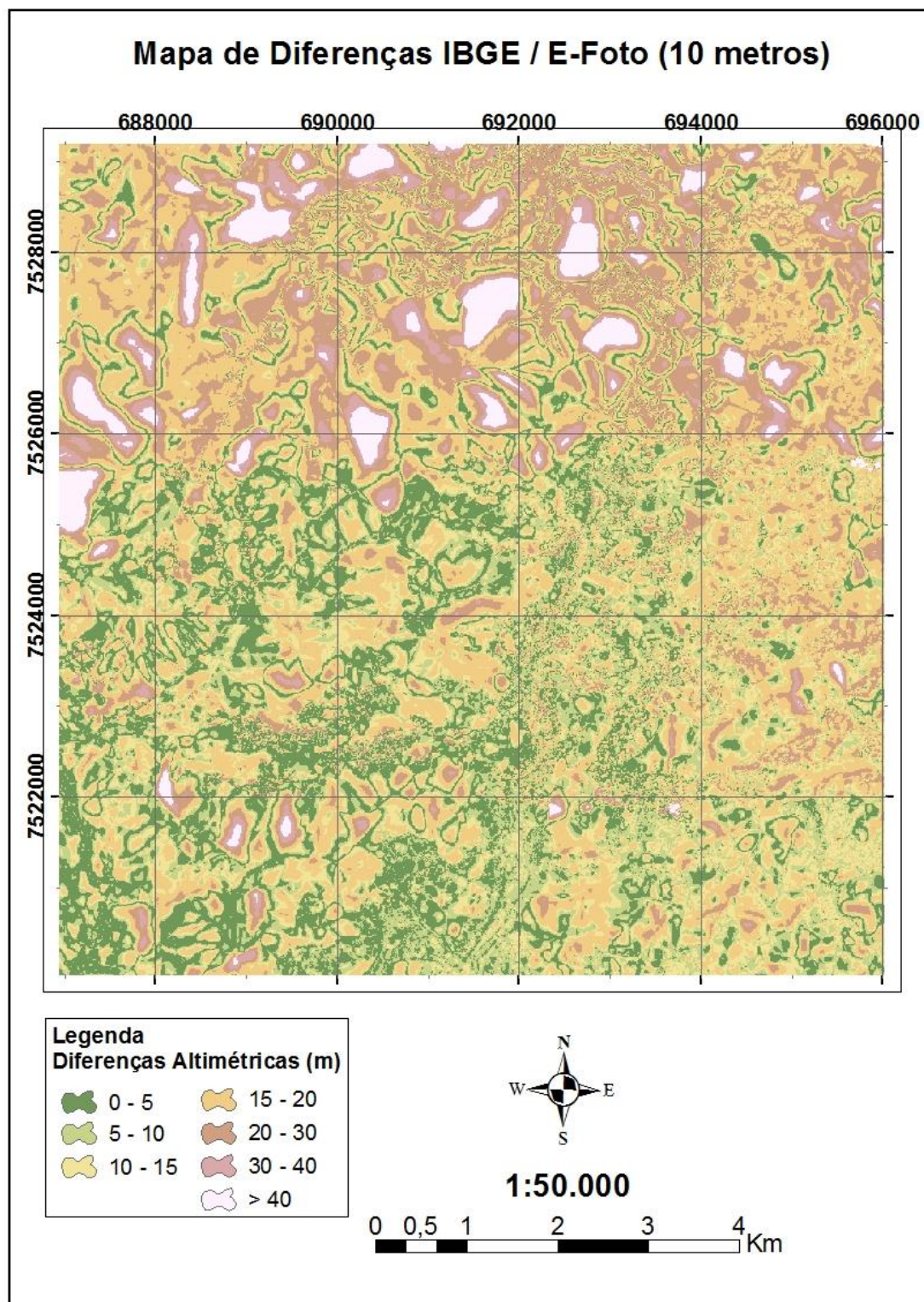









Figura 7.2 - Mapa de diferenças entre o MDS do IBGE e do E-Foto

Na Tabela 7.2, observa-se que mais da metade dos 143,49 km<sup>2</sup> de área total apresentam diferenças inferiores a 15 metros, e 81,85% com diferenças de até 30 metros. E as diferenças acima de 40 metros não chegaram a 10% do total da área.



Tabela 7.2 - Diferenças altimétricas entre o MDS do E-Foto e do IBGE

Diferenças IBGE - E-Foto (ambos 10 metros)				
Diferenças Altimétricas (m)	Quantidade de Células	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área Acumulada (%)
 0 - 5	266581	26,66	18,58	18,58
 5 - 10	291613	29,16	20,32	38,90
 10 - 15	237274	23,73	16,54	55,44
 15 - 20	161578	16,16	11,26	66,70
 20 - 30	217417	21,74	15,15	81,85
 30 - 40	121483	12,15	8,47	90,32
 > 40	138993	13,90	9,69	100,00
<b>Total =&gt;</b>	<b>1434939</b>	<b>143,49</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Tais resultados são relevantes e expressaram o comportamento algoritmo de extração automática do MDS pelo programa E-Foto. Por outro lado, é importante ressaltar que este modelo foi gerado por um programa ainda em desenvolvimento, e comparado com o modelo do IBGE, extraído a partir de um *software* proprietário.

Para a realização de mais uma análise numérica, foram utilizados os pontos de campo, as RRNN da região em comum entre os modelos do IBGE e do E-Foto, além do vértice de triangulação e a estação SAT GPS. O valor altimétrico desses pontos materializados em campo foi comparado ao seu correspondente na superfície do TIN.

Foram determinados os intervalos de confiança de 99,99% sobre as diferenças altimétricas entre os pontos de campo com coordenadas conhecidas e o MDS do E-Foto, com o objetivo de eliminar da distribuição os erros grosseiros e a partir daí obter a média e o desvio padrão dos erros altimétricos.

A Tabela 7.3 mostra o resultado da média aritmética ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão ( $s$ ) para as diferenças altimétricas do MDS do E-Foto em relação aos pontos de campo utilizados para o cálculo.

Tabela 7.3 - Erros altimétricos do modelo do E-Foto com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>MDS (10 m)</b>				
<b>E-Foto</b>	<b>12,95</b>	<b>9,67</b>	<b>21,0</b>	<b>12,10</b>

Do resultado exposto na tabela acima, nota-se que o modelo do E-Foto obteve erros acima de 12 metros em relação aos pontos de campo.

A Tabela 7.4 mostra que, na comparação dos modelos, o do E-Foto obteve um resultado distante em relação ao do IBGE, principalmente no que diz respeito aos pontos de campo. Essa diferença ficou acima de 8 metros.

Tabela 7.4 - Comparação dos erros altimétricos entre os modelos do E-Foto e IBGE com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
MDS (10 m)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>E-Foto</b>	<b>12,95</b>	<b>9,67</b>	<b>21</b>	<b>12,10</b>
<b>IBGE</b>	<b>8,20</b>	<b>5,25</b>	<b>3,30</b>	<b>3,35</b>

### 7.3. Comparação entre o MDS do LPS e do IBGE

A metodologia aplicada no Item 7.2 foi repetida para a avaliação do MDS extraído do programa LPS.

A análise visual mostrou que, quando inserida a mesma base cartográfica na escala de 1:25.000 no modelo do LPS, foi percebido um bom comportamento na área de estudo, mesmo nas regiões de altitudes mais baixas do MDS. A Figura 7.3 mostra o MDS gerado a partir dos dados do LPS com 10 metros de resolução e utilizado para comparação visual.

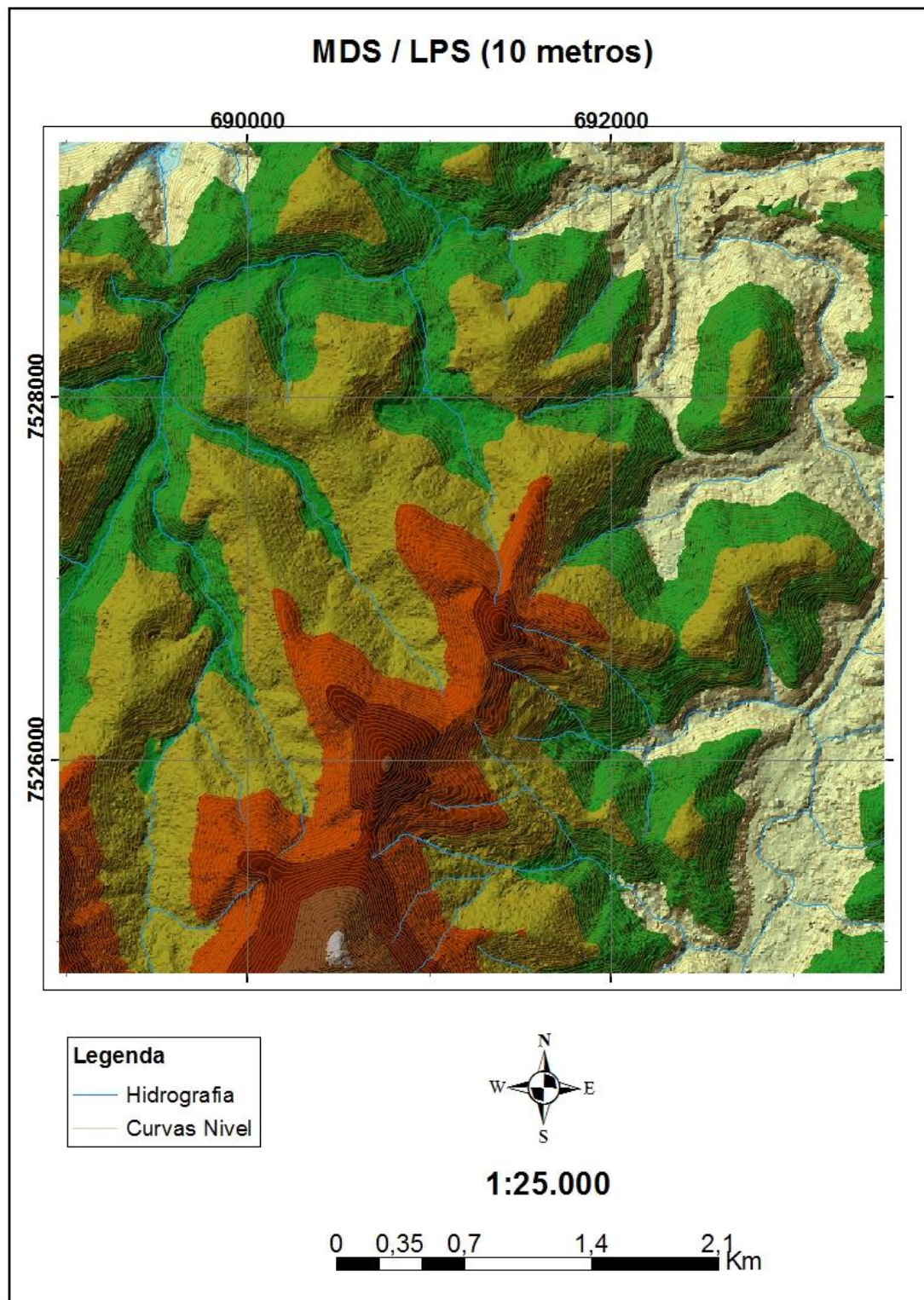


Figura 7.3 - Análise visual do MDS extraído do LPS

Com a subtração entre as duas superfícies, sendo MDS do IBGE menos MDS do LPS, verificou-se uma pequena variação dos valores altimétricos de acordo com a região. A superfície como um todo teve as diferenças, em sua maioria, valores que não

ultrapassaram 5 metros. Na parte mais ao norte da superfície, as maiores diferenças foram encontradas, mas em quantidade pequena em relação ao total da área. Foi obtido também o mapa das diferenças entre os dois modelos, dividindo os erros altimétricos novamente em intervalos não regulares de forma que, com o menor número de classes, fosse obtida uma representação clara dos resultados a que se chegou. Com isso, foi possível obter as análises visual e numérica ao mesmo tempo, como mostram a Figura 7.4 e a Tabela 7.5.



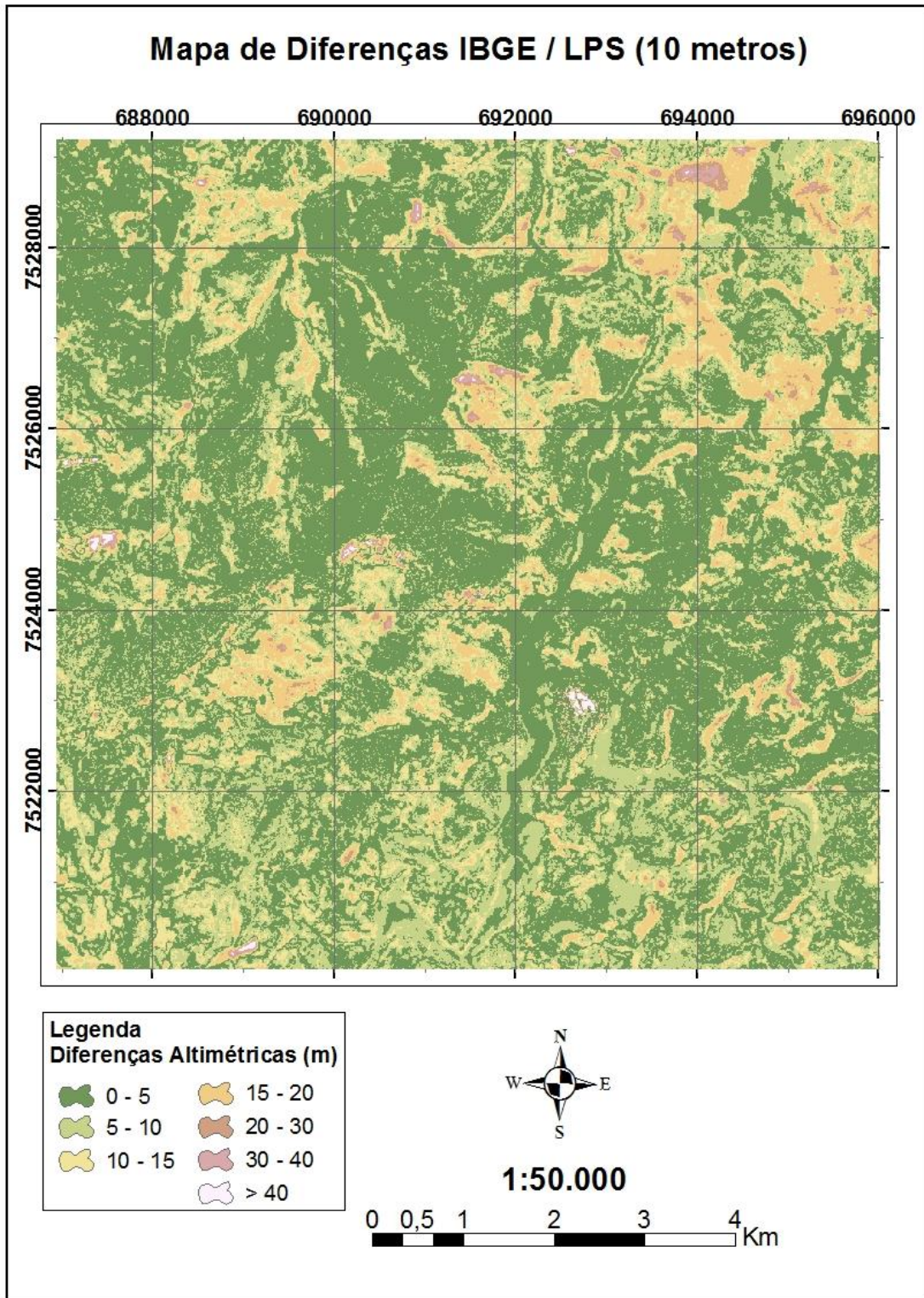









Figura 7.4 - Mapa de diferenças entre MDS do IBGE e do LPS



Tabela 7.5 - Diferenças altimétricas entre o MDS do LPS e do IBGE

Diferenças IBGE - LPS (ambos 10 metros)				
Diferenças Altimétricas	Quantidade de Células	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área Acumulada (%)
 0 - 5	655982	65,60	45,72	45,72
 5 - 10	434105	43,41	30,25	75,97
 10 - 15	205475	20,55	14,32	90,29
 15 - 20	76510	7,65	5,33	95,62
 20 - 30	47438	4,74	3,31	98,93
 30 - 40	10182	1,02	0,71	99,64
 > 40	5247	0,52	0,37	100,00
<b>Total =&gt;</b>	<b>1434939</b>	<b>143,49</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Na Tabela 7.5, observa-se que aproximadamente 76% da área total apresentam diferenças inferiores a 10 metros. As diferenças acima de 15 metros não chegaram a atingir 10% da área.

Para a realização da análise numérica, mais uma vez, foram utilizados os pontos de campo, as RRNN em comum entre os modelos do IBGE e do LPS, além do vértice de triangulação e a estação SAT GPS. As coordenadas altimétricas desses pontos foram comparadas às suas correspondentes geradas na superfície do modelo digital de superfície.

Novamente, foram aplicados os intervalos de confiança de 99,99% sobre as diferenças altimétricas entre os pontos citados no parágrafo acima com coordenadas conhecidas e o MDS do LPS; a partir daí, foi obtido a média e o desvio padrão dos erros altimétricos.

A Tabela 7.6 mostra a média aritmética ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão (s) para as diferenças altimétricas do MDS do LPS em relação aos pontos de coordenadas conhecidas utilizados para o cálculo. Os valores foram calculados em módulo.

Tabela 7.6 - Erros altimétricos do modelo do LPS com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
MDS (10 m)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>LPS</b>	<b>9,08</b>	<b>5,57</b>	<b>4,23</b>	<b>4,27</b>

Na Tabela 7.7, o modelo do LPS obteve praticamente o mesmo resultado do modelo do IBGE em relação aos pontos de campo e muito próximo em relação às RRNN.

Tabela 7.7 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos do IBGE e LPS com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m)

MDS (10 m)	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>LPS</b>	<b>9,08</b>	<b>5,57</b>	<b>4,23</b>	<b>4,27</b>
<b>IBGE</b>	<b>8,20</b>	<b>5,25</b>	<b>3,30</b>	<b>3,35</b>

#### 7.4. Comparação entre o MDS do E-Foto e do LPS

Depois das comparações entre os modelos gerados pelo processo fotogramétrico terem sido avaliados e comparados com o modelo do IBGE, foi feita uma comparação entre eles, com o intuito de contribuir com o desenvolvimento das estações fotogramétricas utilizadas nesta dissertação.

A comparação foi realizada, mais uma vez, com a subtração entre as duas superfícies, sendo MDS do E-Foto menos MDS do LPS, verificando-se uma pequena variação dos valores altimétricos de acordo com a região. Na maior parte da área de estudo, as diferenças não ultrapassaram 10 metros. Na parte norte da superfície, foram encontradas diferenças maiores do que 30 metros, mas em quantidade pequena em relação ao total da área. Para uma melhor percepção, a Figura 7.5 mostra o mapa das diferenças obtido entre os dois modelos. As diferenças altimétricas estão divididas novamente em intervalos não regulares, de forma que, com o menor número de classes, fosse obtida uma representação clara dos resultados, como mostra a Tabela 7.8.

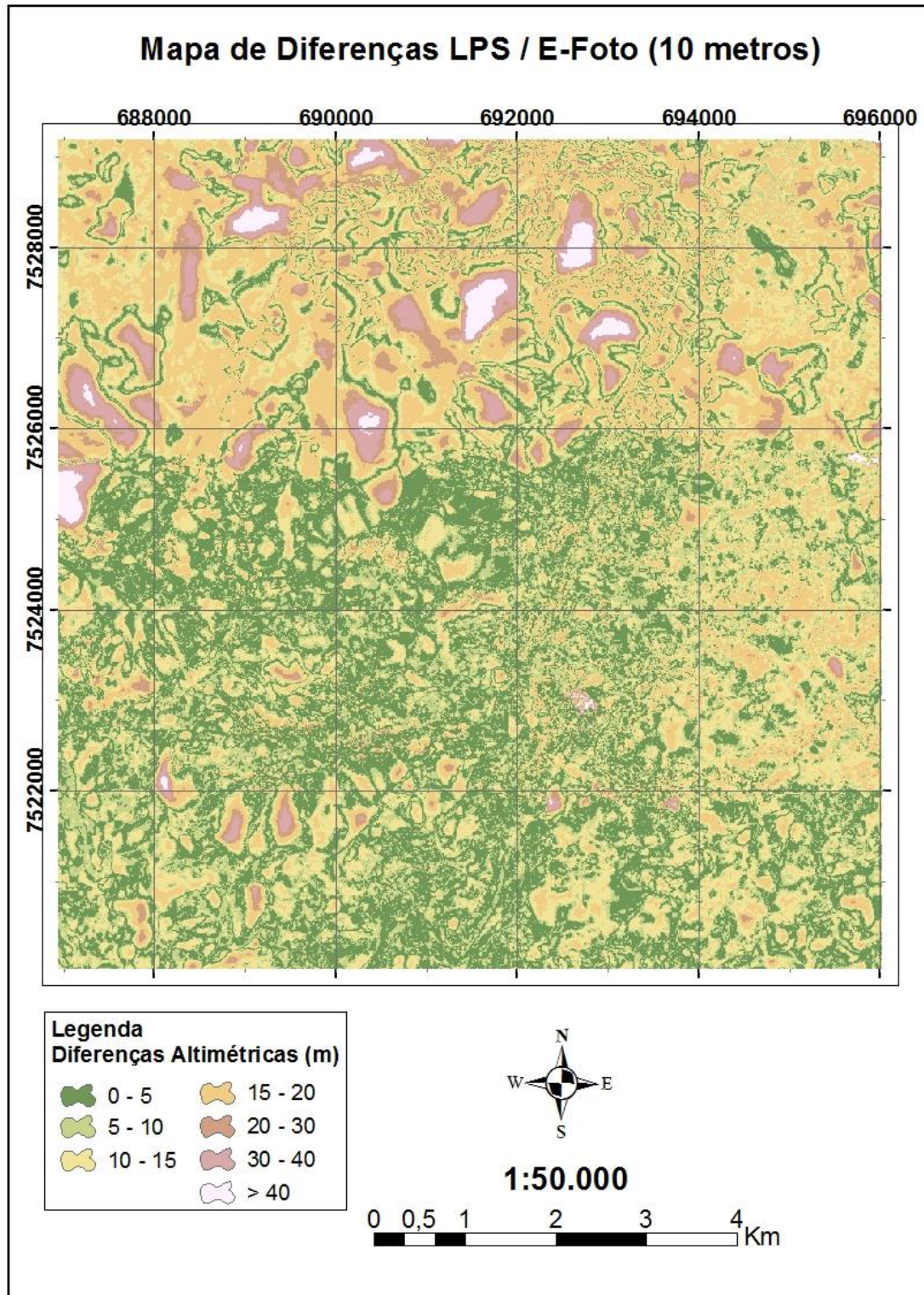









Figura 7.5 - Mapa de diferenças entre MDS do E-Foto e do LPS

Tabela 7.8 - Diferenças altimétricas entre o MDS do E-Foto e do LPS

Diferenças E-Foto - LPS (ambos 10 metros)				
Diferenças Altimétricas	Quantidade de Células	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área Acumulada (%)
 0 - 5	437307	43.73	30.48	30.48
 5 - 10	332300	33.23	23.16	53.63
 10 - 15	211670	21.17	14.75	68.39
 15 - 20	126670	12.67	8.83	77.21
 20 - 30	155147	15.51	10.81	88.03
 30 - 40	81128	8.11	5.65	93.68
 > 40	90709	9.07	6.32	100.00
<b>Total =&gt;</b>	<b>1434931</b>	<b>143.49</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

Na tabela acima, observa-se que 30,48% da área total apresentam diferenças inferiores a 5 metros. As diferenças maiores do que 40 metros não chegaram a 7% da área.

Para manter o mesmo critério dos itens anteriores, foram utilizados os pontos de coordenadas conhecidas em comum entre os modelos do E-Foto e LPS para uma análise numérica, como mostra a Tabela 7.9. Também foram acrescentados à tabela, os valores do desvio padrão do MDS do IBGE, para uma comparação com os modelos do E-Foto e LPS.

Tabela 7.9 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos do IBGE, E-Foto e LPS com o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade (MDS 10 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
MDS (10 m)				
<b>IBGE</b>	<b>8,20</b>	<b>5,25</b>	<b>3,30</b>	<b>3,35</b>
<b>LPS</b>	<b>9,08</b>	<b>5,57</b>	<b>4,23</b>	<b>4,27</b>
<b>E-Foto</b>	<b>12,95</b>	<b>9,67</b>	<b>21,0</b>	<b>12,10</b>

A tabela acima evidencia, mais uma vez, uma diferença altimétrica muito pequena entre os modelos do IBGE e LPS, menor do que 1 metro, mas, por outro lado, uma diferença um pouco maior entre os modelos do IBGE e E-Foto.

## 7.5. Avaliação do MDS da SRTM

Nesta dissertação, o MDS gerado pela SRTM será usado para comparações com os modelos extraídos pelo E-Foto e LPS. Para isso, foi realizada uma análise numérica que apontou que, quando comparado com os pontos de campo com coordenadas conhecidas (PC, RRNN, SAT e VT), mostrou-se em boas condições e pôde ser comparado com os modelos extraídos pelo E-Foto e LPS.

Foram determinados os intervalos de confiança de 99,99% sobre as diferenças altimétricas entre os pontos de campo com coordenadas altimétricas conhecidas e o MDS da SRTM.

A tabela abaixo mostra a média aritmética ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão (s) para as diferenças altimétricas do modelo em relação aos pontos de campo e as RRNN utilizadas para o cálculo. Os valores foram calculados em módulo e podem ser vistos na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Erros altimétricos do modelo da SRTM com o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade (MDS 90 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
MDS (90 m)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>SRTM</b>	<b>19,25</b>	<b>5,82</b>	<b>16,52</b>	<b>13,87</b>

A tabela acima destaca um erro de 13,87 metros na comparação com os pontos de campo. É importante ressaltar que essas diferenças altimétricas estão diretamente ligadas ao fato do MDS ter sido gerado com um espaçamento de grade de 90 metros.

## 7.6. Comparação entre os MDS do E-Foto e da SRTM

Foi realizada a subtração entre as duas superfícies, sendo MDS da SRTM menos MDS do E-Foto, só que agora ambos com a resolução de 90 metros. Verificou-se uma variação dos valores altimétricos de acordo com a região.

Nesse mapa de diferenças (Figura 7.6), ficou bem nítida a forma dos píxeis de 90 metros. A superfície como um todo apresentou diferenças altimétricas grandes entre os modelos, o que ficou muito evidente na parte norte da superfície onde se obtiveram

diferenças maiores que 40 metros. Essas diferenças altimétricas podem ser vistas na Tabela 7.11 através de intervalos não regulares, de forma que, com o menor número de classes, fosse obtida uma representação clara dos resultados em toda a área.



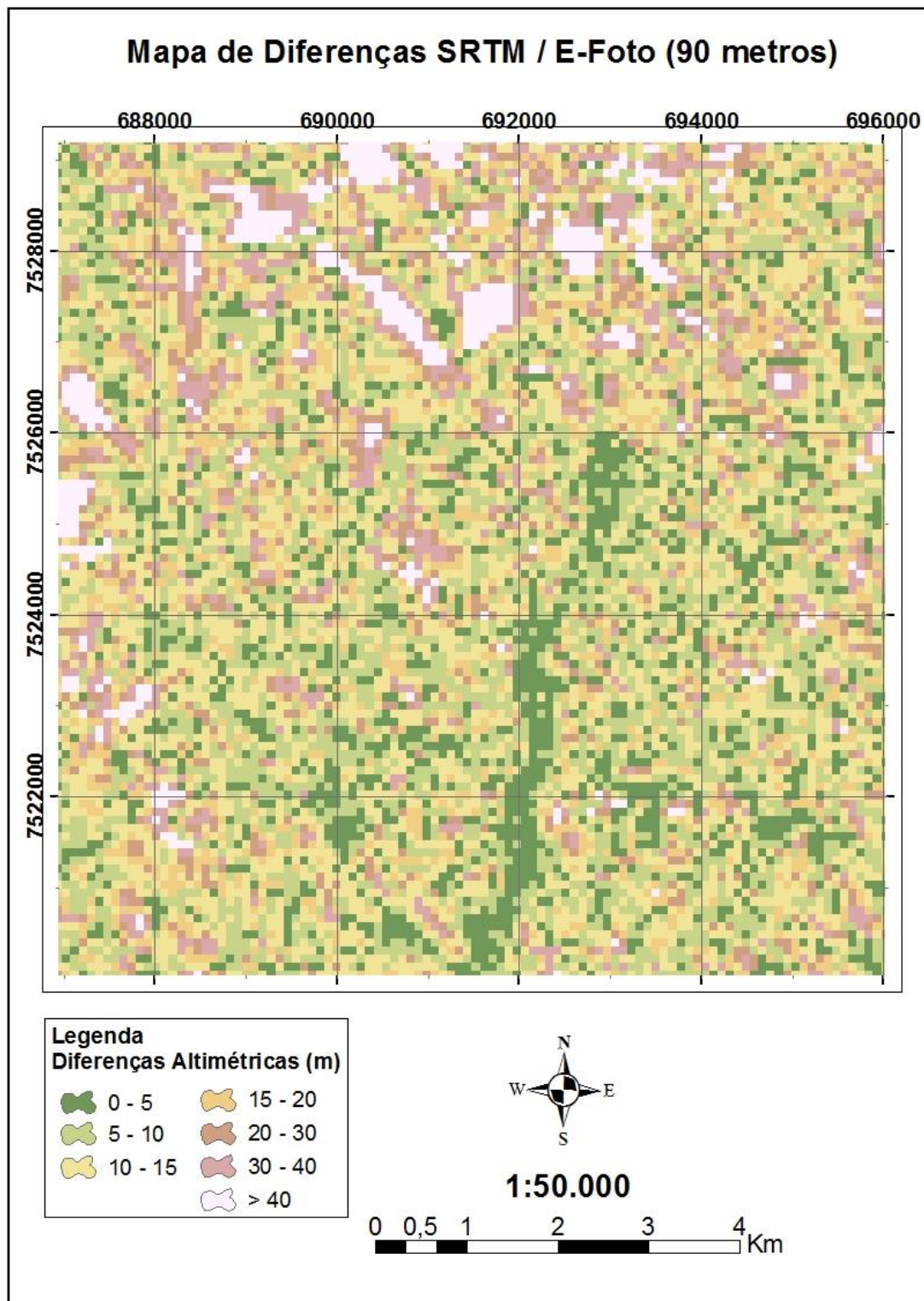









Figura 7.6 - Mapa de diferenças entre MDS do E-Foto e da SRTM

Tabela 7.11 - Diferenças altimétricas entre o MDS da SRTM e do E-Foto

Diferenças SRTM - E-Foto (ambos 90 metros)				
Diferenças Altimétricas	Quantidade de Células	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área Acumulada (%)
 0 - 5	2700	21.87	15.25	15.25
 5 - 10	2348	19.02	13.26	28.51
 10 - 15	2158	17.48	12.19	40.69
 15 - 20	1847	14.96	10.43	51.13
 20 - 30	3061	24.79	17.29	68.41
 30 - 40	2164	17.53	12.22	80.63
 > 40	3430	27.78	19.37	100.00
<b>Total =&gt;</b>	<b>17708</b>	<b>143.43</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

A análise numérica contou com os pontos de verificação, as RRNN da região em comum entre os modelos da SRTM e do E-Foto, além do vértice de triangulação e a estação SAT GPS. O valor altimétrico desses pontos materializados em campo foi comparado ao seu correspondente na superfície do TIN.

Seguindo o mesmo critério dos itens anteriores, foram determinados os intervalos de confiança de 99,99% sobre as diferenças altimétricas entre os pontos de campo com coordenadas conhecidas e o MDS do E-Foto com o objetivo de eliminar da distribuição os erros grosseiros e, a partir daí, obter a média e o desvio padrão dos erros altimétricos.

A Tabela 7.12 mostra o resultado da média aritmética ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão (s) para as diferenças altimétricas entre os modelos em relação aos pontos de verificação e as RRNN utilizadas para o cálculo. Os valores foram calculados em módulo.

Tabela 7.12 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos da SRTM e do E-Foto com o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade (MDS 90 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
MDS (90 m)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>E-Foto</b>	<b>12,02</b>	<b>6,18</b>	<b>17,40</b>	<b>11,30</b>
<b>SRTM</b>	<b>19,25</b>	<b>5,82</b>	<b>16,52</b>	<b>13,87</b>



Destaca-se, da Tabela 7.12, as diferenças altimétricas muito próximas entre os modelos, o MDS da SRTM é ligeiramente superior em relação às RRNN, inferior ao MDS do E-Foto em relação aos pontos de campo.

### **7.7. Comparação entre o MDS do LPS e da SRTM**

Assim como no item 7.3, foi feita uma subtração entre duas superfícies, sendo MDS do LPS, só que agora ambos com a resolução de 90 metros, menos o MDS da SRTM.

Mais uma vez, ficou nítida, nesse mapa de diferenças (Figura 7.7), a forma dos píxeis de 90 metros. A superfície como um todo apresentou diferenças altimétricas bem distribuídas entre os modelos, o que ficou muito evidente em toda a superfície onde novamente obtiveram-se diferenças maiores que 40 metros em 20,33% da área. Essas diferenças altimétricas podem ser vistas na Tabela 7.13.

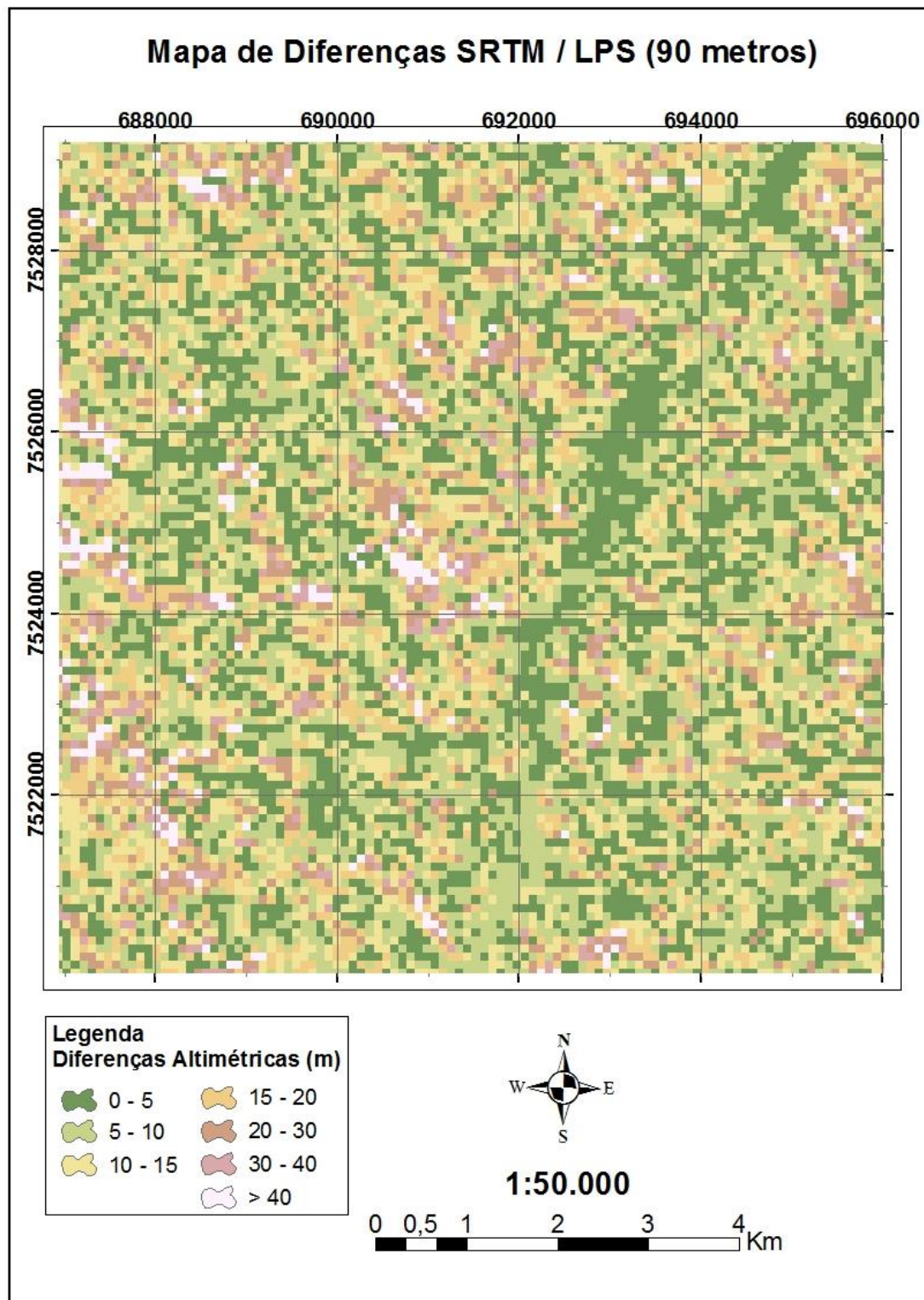









Figura 7.7- Mapa de diferenças entre MDS do LPS e da SRTM

Tabela 7.13 - Diferenças altimétricas entre o MDS da SRTM e do LPS

Diferenças SRTM - LPS (ambos 90 metros)				
Diferenças Altimétricas	Quantidade de Células	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área Acumulada (%)
 0 - 5	2364	19,15	13,35	13,35
 5 - 10	2448	19,83	13,82	27,18
 10 - 15	2378	19,26	13,43	40,60
 15 - 20	2175	17,62	12,28	52,89
 20 - 30	3477	28,16	19,64	72,52
 30 - 40	2356	19,08	13,31	85,83
 > 40	2510	20,33	14,17	100,00
<b>Total =&gt;</b>	<b>17708</b>	<b>143,43</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Após mais uma análise numérica, e com a determinação dos intervalos de confiança de 99,99% sobre as diferenças altimétricas entre os pontos de campo e os seus homólogos no MDS do LPS, a Tabela 7.14 mostra o resultado da média aritmética ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão (s) para as diferenças altimétricas entre os modelos em relação aos pontos de verificação e as RRNN utilizadas para o cálculo. Os valores foram todos calculados em módulo.

Tabela 7.14 - Comparação dos erros altimétricos dos modelos da SRTM e do LPS com o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade (MDS 90 m)

	Média e Desvio Padrão dos Erros Altimétricos (m)			
	RRNN		Pontos de Campo	
MDS (90 m)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>LPS</b>	<b>11,94</b>	<b>8,48</b>	<b>5,80</b>	<b>6,58</b>
<b>SRTM</b>	<b>19,25</b>	<b>5,82</b>	<b>16,52</b>	<b>13,87</b>

Na comparação da Tabela 7.14, observa-se que o resultado do MDS do LPS foi muito superior ao MDS da SRTM, com uma diferença duas vezes maior. Para as RRNN, o modelo da SRTM foi superior, tendo um resultado melhor do que o do LPS.

## CAPÍTULO 8 - APLICAÇÕES EM HIDROLOGIA

### 8.1. Aplicações dos Modelos Digitais de Superfície

A Cartografia contribui através dos conhecimentos de topografia, que são fundamentais, primeiramente, para a delimitação de uma bacia hidrográfica, que é definida, por VIESSMAN *et al.* (1977), como a área definida topograficamente, drenada por um curso de água, tal que toda a vazão efluente seja escoada através de uma simples saída ou seção exutória. Possibilita uma análise quantitativa dos atributos do relevo, proporcionando o entendimento da estrutura morfológica do sistema relevo e a identificação de áreas de risco à apropriação antrópica, uma vez que permite a localização de setores mais susceptíveis à ação da erosão.

A criação de um modelo digital de superfície corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema da elaboração e implantação de projetos. A partir dos modelos, é possível calcular volume, área, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade, aspecto e perspectivas tridimensionais (FELGUEIRAS, 2004).

Para submeter os modelos digitais de superfície a aplicações na área de hidrologia, foram cumpridas duas etapas. A primeira foi utilizar cada MDS extraído das estações fotogramétricas digitais (E-Foto e LPS) com resolução de 10 metros para derivar os seguintes atributos topográficos: mapas de declividade, de aspecto, de curvatura e hipsométrico. A segunda foi usar os modelos digitais de superfície do E-Foto e LPS, com resolução de 90 metros, e MDS da SRTM para a delimitação de bacias hidrográficas dentro da área de estudo.

As duas etapas ora em tela foram executadas no ArcGIS, nas extensões *3D Analyst* e *Spatial Analyst*.

### 8.2. Mapa Hipsométrico

A partir do modelo digital de superfície, pode-se gerar o mapa hipsométrico, o qual apresenta as inter-relações da espacialização horizontal do terreno com a variação das cotas altimétricas, permitindo identificar e entender, por exemplo, os processos erosivos do relevo, o que está diretamente relacionado com o processo de escoamento superficial. Apresenta, também, a classificação do MDS, representando a variação de

altitude em classes ou intervalos pré-determinados, através de seqüências cromáticas convencionais, conhecidas como cores hipsométricas, de acordo com o nível de variação altimétrica do terreno.

### **8.2.1. Curva Hipsométrica**

É a representação gráfica do relevo médio da bacia hidrográfica. Representa o estudo da variação altimétrica da bacia com referência ao nível do mar. Essa variação é indicada por meio da construção de um gráfico, que mostra, em termos da porcentagem, a área de drenagem da bacia hidrográfica que se encontra acima ou abaixo das várias elevações.

Com ela, têm-se as informações da elevação média da bacia, além da variação da altitude, elementos importantes que influenciam a precipitação e as perdas por evaporação e transpiração e, conseqüentemente, influenciam o deflúvio médio.

#### **8.2.1.1. Cálculo do Mapa Hipsométrico e da Curva Hipsométrica**

O primeiro mapa hipsométrico foi obtido a partir da reclassificação do MDS extraído pelo programa E-Foto com resolução de 10 metros, em intervalos de altitudes pré-definidos definidos, agrupados em 9 classes com variação de 100 metros entre elas, o que coincide com os principais níveis topográficos observados. O segundo mapa foi obtido utilizando a mesma metodologia descrita, porém, agora, com o MDS extraído do programa LPS com resolução de 10 metros.

Os mapas hipsométricos encontram-se a seguir e estão representados pelos modelos classificados em cores hipsométricas (Figuras 8.1 e 8.2). Já a Figura 8.3 representam as curvas hipsométricas geradas pelos modelos do E-Foto e do LPS.

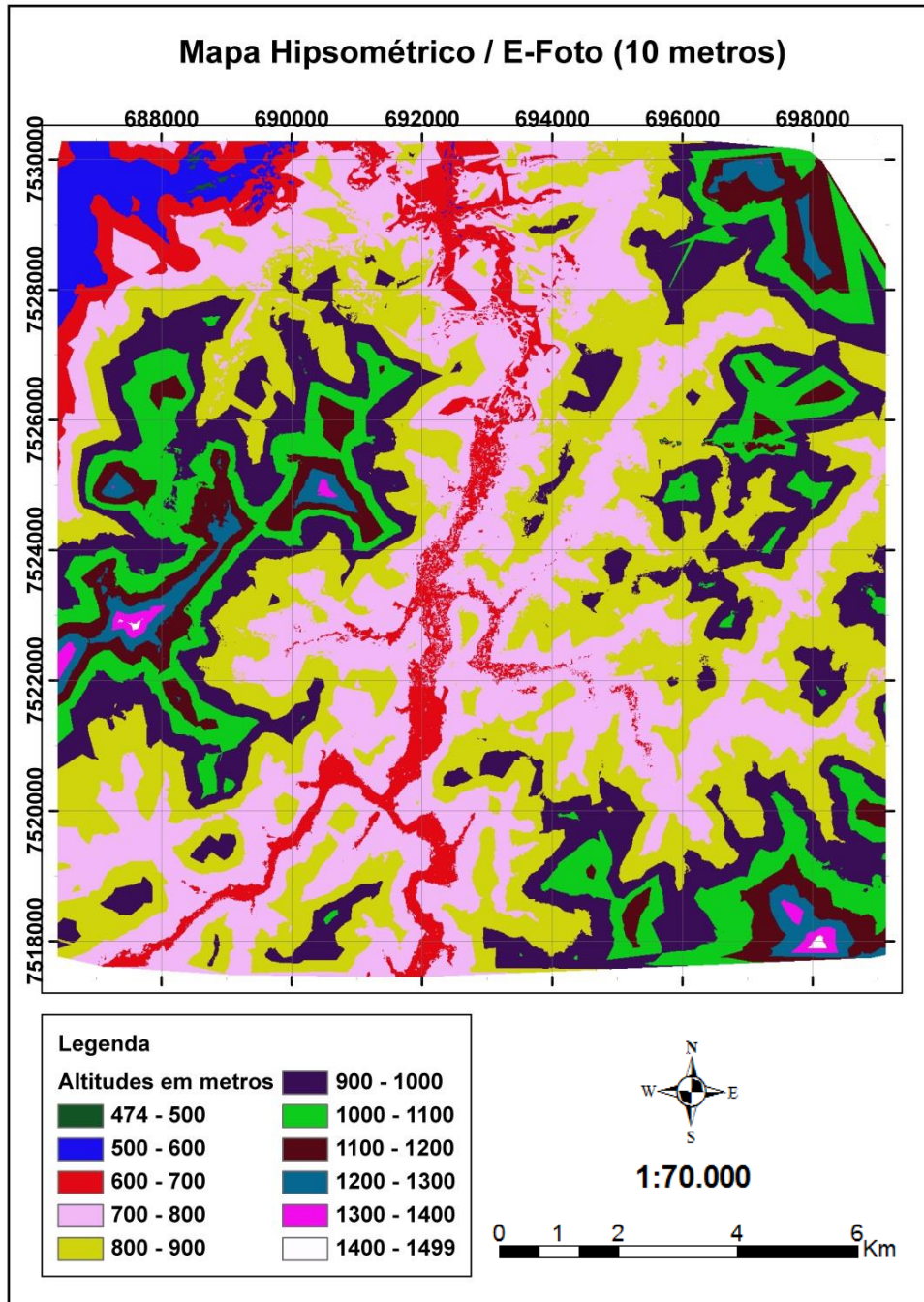


Figura 8.1 - Mapa hipsométrico gerado pelo MDS do E-Foto



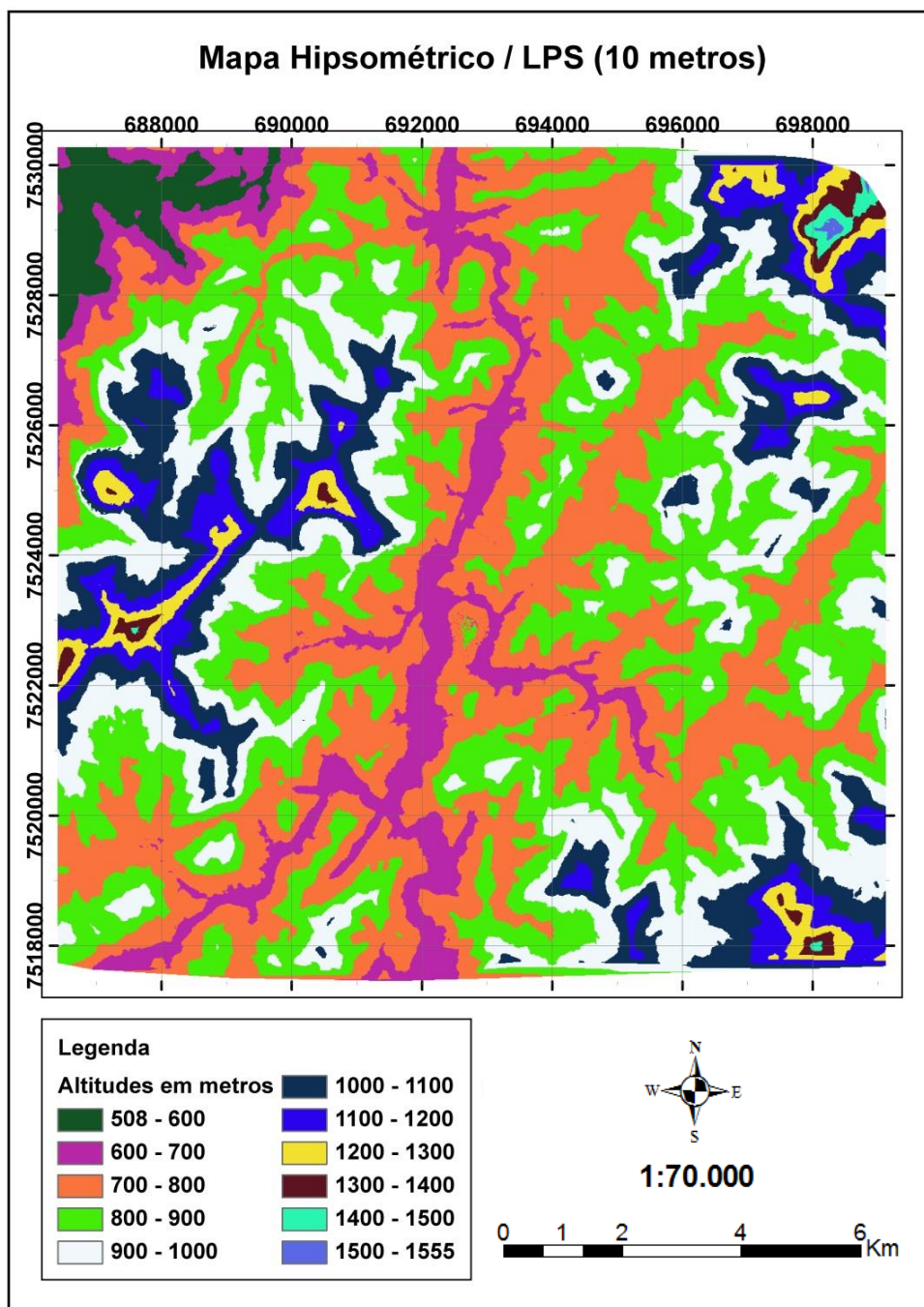


Figura 8.2 - Mapa hipsométrico gerado pelo MDS do LPS

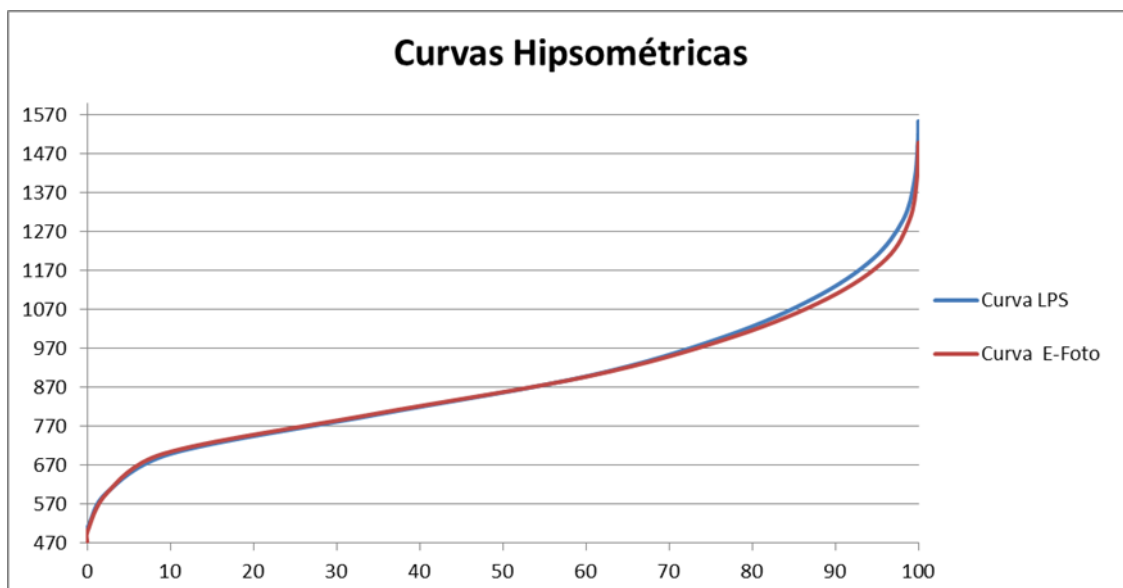


Figura 8.3 - Curva hipsométrica gerada por cada MDS

### 8.3. Declividade

A declividade é a inclinação maior ou menor do relevo em relação ao horizonte. Na representação em curvas de nível, observa-se que, quanto maior for a inclinação, tanto mais próxima se encontram as curvas de nível. Inversamente, elas serão tanto mais afastadas quanto mais suave for o declive (GUERRA, 1989).

A carta de declividade tem sido considerada um documento básico para o planejamento regional (DE BIASI, 1970). É um produto importante nos estudos hidrológicos, possibilitando a visualização da declividade das vertentes e um melhor realce nas áreas com declividades homogêneas. As velocidades do escoamento superficial e sub-superficial em uma bacia hidrográfica são determinadas pela declividade do terreno. O gradiente, por sua vez, representa a máxima razão de variação da cota  $Z$ . A velocidade de escoamento determina o tempo de escoamento que leva um dado volume de água das precipitações que atingem uma dada região a alcançar os canais fluviais.

A declividade pode ser expressa em graus ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) ou em porcentagem expressas pela equação  $D = \arctg \{[(\delta Z / \delta X)^2 + (\delta Z / \delta Y)^2]^{1/2}\}$ , onde  $\delta Z / \delta X$  e  $\delta Z / \delta Y$  são as derivadas parciais nas direções  $X$  e  $Y$ , correspondendo a componentes do vetor gradiente em uma dada posição, onde os elementos  $Z$  estão distribuídos segundo uma



vizinhança de 8 elementos, com cálculo da declividade sendo atribuída ao elemento central (FELGUEIRAS, 2004).

A Figura 8.4 ilustra a distribuição dos elementos da grade segundo uma vizinhança de 8 células.

$Z_{i-1,j+1}$	$Z_{i,j+1}$	$Z_{i+1,j+1}$
$Z_{i-1,j}$	$Z_{i,j}$	$Z_{i+1,j}$
$Z_{i-1,j-1}$	$Z_{i,j-1}$	$Z_{i+1,j-1}$

Figura 8.4 - Distribuição dos elementos na grade

Fonte: FELGUEIRAS (2004)

### 8.3.1. Cálculo da declividade

Disponível na extensão 3D Analyst, esse procedimento identifica a taxa máxima de variação da altitude de cada célula. O procedimento foi executado pela ferramenta *Raster Surface*, utilizando a opção *Slope*.

O dado de entrada é o MDS gerado pelo E-Foto, tendo como saída uma grade regular contendo o valor da declividade em porcentagem. Nesse caso, foi calculado em graus, e o tamanho da célula foi definido como 10 metros, sendo o valor compatível com a resolução dos dados de entrada. Todo o processo foi repetido para o MDS do LPS.

As classes de declividades geradas foram reclassificadas em 6 intervalos distintos sugeridos pela Embrapa (1979), como mostra a Tabela 8.1. Essa operação foi realizada utilizando a técnica de reclassificação.

Tabela 8.1 - Classificação da declividade

Declividade (%)	Discriminação
0-3	Relevo plano
3 - 8	Relevo suave ondulado
8 - 20	Relevo ondulado
20 - 45	Relevo forte ondulado
45 - 75	Relevo montanhoso
> 75	Relevo forte montanhoso

#### **8.3.1.1. Mapa de Declividade**

Foram obtidos os mapas de declividades para a área de interesse, divididos em 6 intervalos e expresso em porcentagem como ilustram as Figuras 8.5 e 8.6.

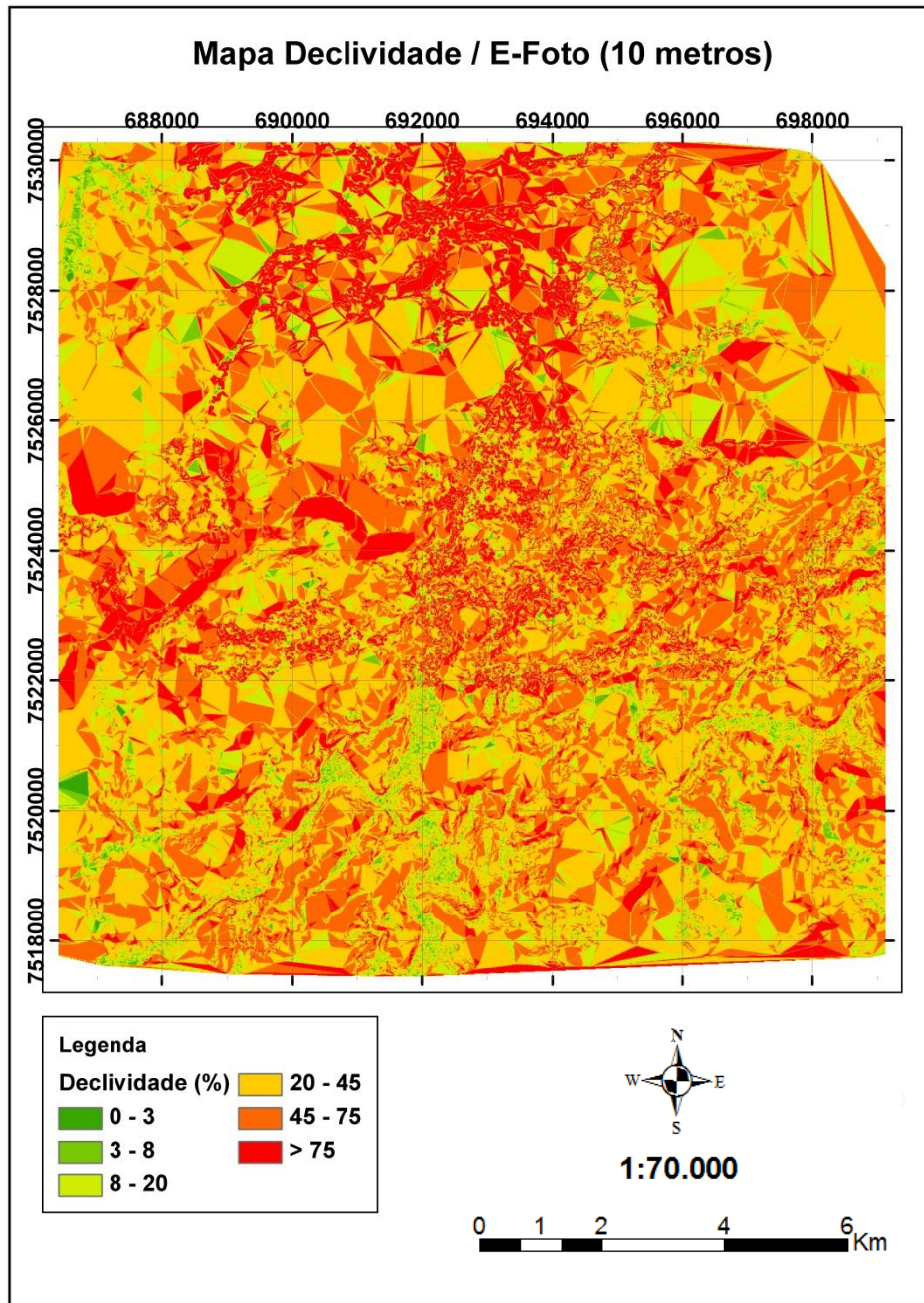


Figura 8.5 - Mapa de declividade gerado pelo MDS do E-Foto

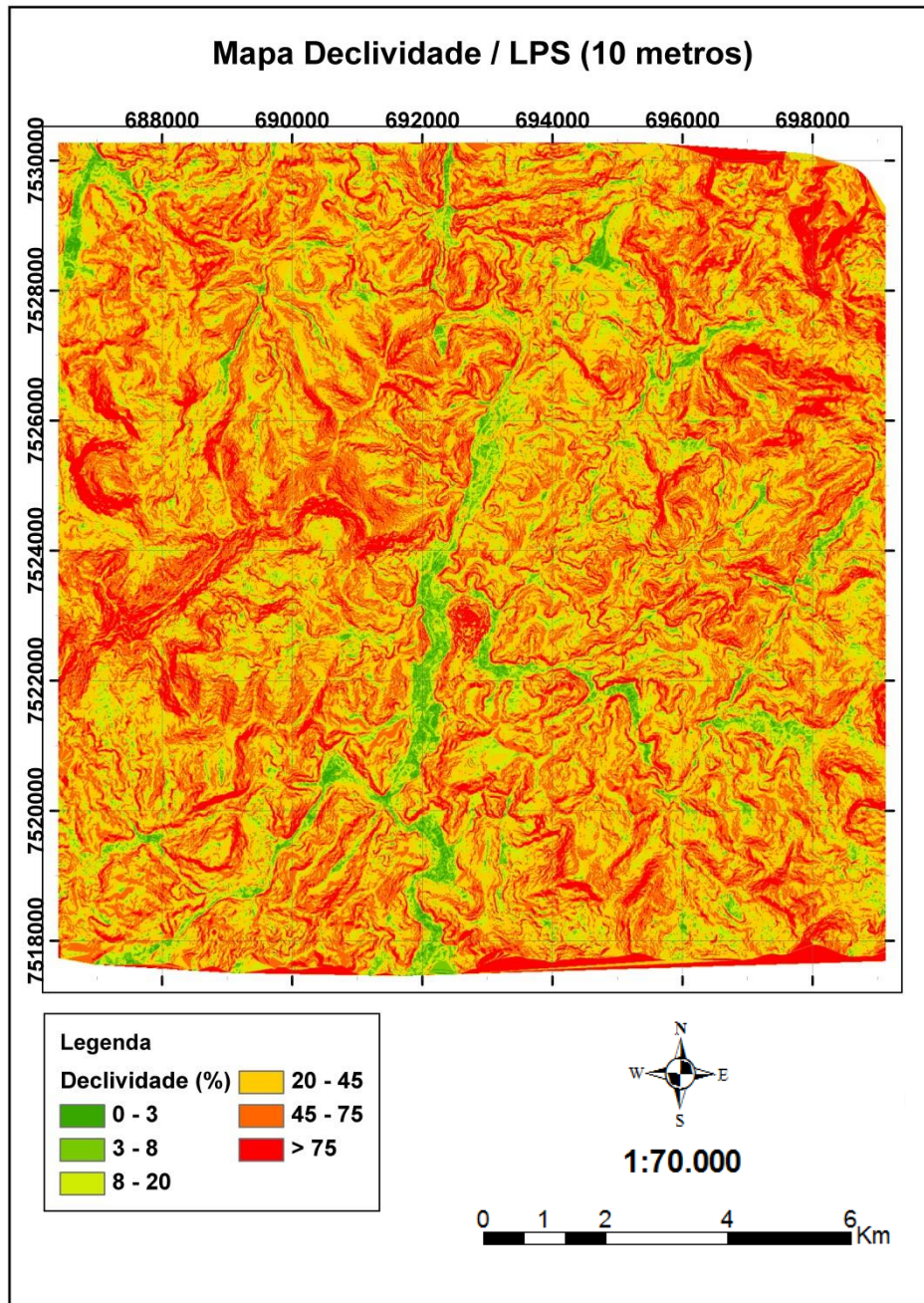


Figura 8.6 - Mapa de declividade gerado pelo MDS do LPS

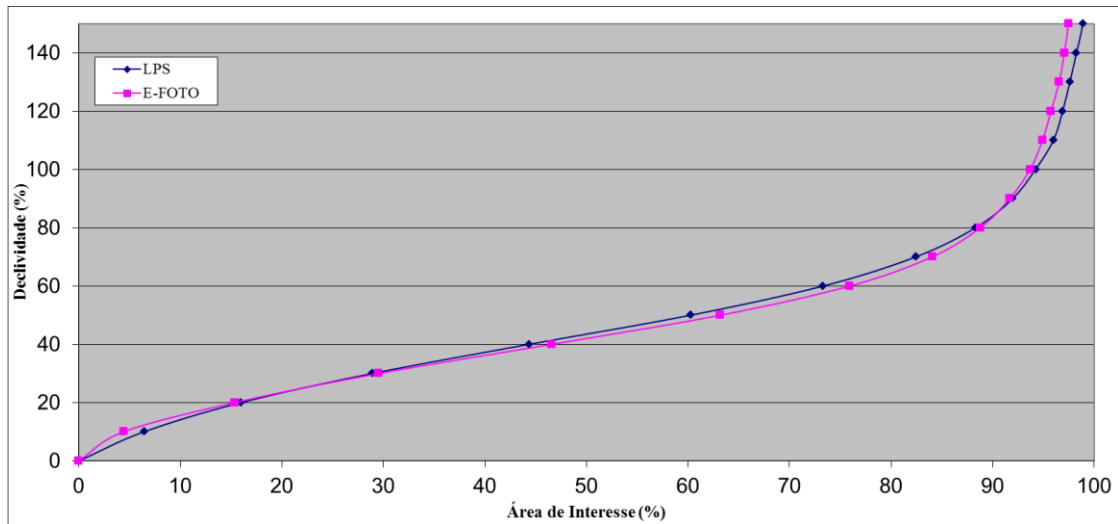


Figura 8.7 - Curvas de declividade geradas pelos modelos do LPS e do E-Foto

### 8.4. Mapa de Aspecto

O aspecto é um dos atributos topográficos mais utilizados por exercer influência sobre o fluxo da água, além de ser relevante nos estudos de erosão, sombreamento, energia solar recebida, temperatura, entre outros.

O aspecto pode ser entendido como a direção da declividade, ou seja, identifica a direção da taxa máxima de mudança no valor Z para cada célula central em relação às suas vizinhas em um plano de 3x3 células (Figura 8.8). É expresso em graus positivos de 0 a 360 graus, medidos a partir do norte no sentido horário. Norte é o zero (0) em uma direção horária, 90 é leste, 180 é sul, e 270 é oeste. Às células de grade de entrada que tem declividade zero (0) (áreas planas), é atribuído o valor “-1” (ESRI, 2014). A Figura 8.9 mostra o esquema de representação desse tema.



Figura 8.8 - Oito possíveis direções de fluxo no cálculo do aspecto  
Fonte: adaptado de ESRI (2014)

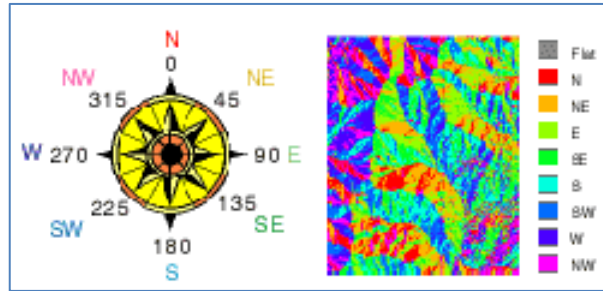


Figura 8.9 - Direção do aspecto

Fonte: ESRI (2014)

#### 8.4.1. Cálculo do aspecto

Utilizando o comando *Aspect*, foi inserido, primeiramente, o MDS do E-Foto e, posteriormente, o MDS do LPS, com o objetivo de se obter a orientação das vertentes e identificar a direção da máxima variação da altitude.

O mapa de aspecto representa a direção da declividade em graus, por se tratar de um MDS com valores contínuos 0 a 360 graus. Para uma melhor percepção, os valores do aspecto foram reclassificados usando o comando *reclassify* (Figuras 8.10 e 8.11).



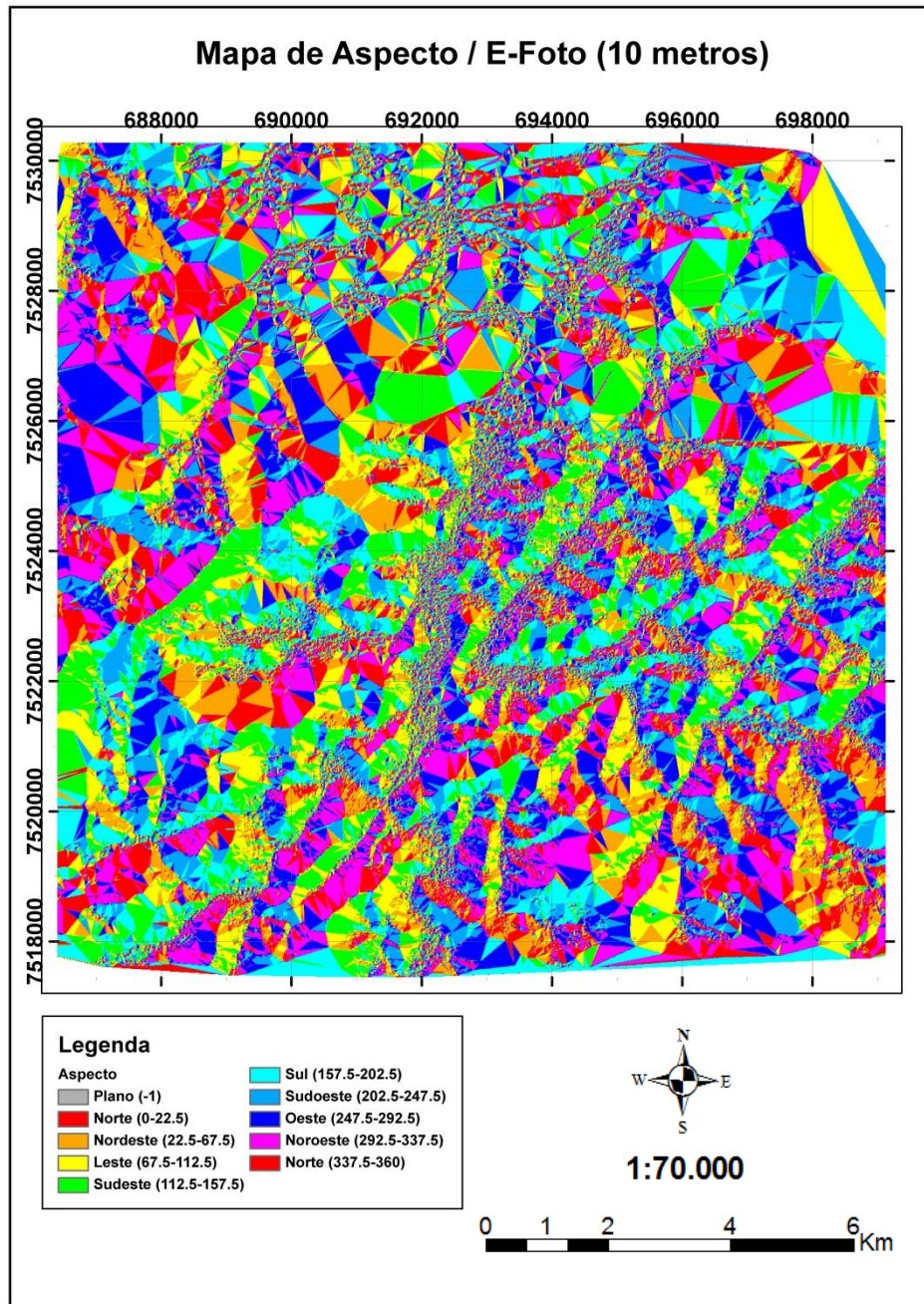


Figura 8.10 - Mapa de aspecto gerado pelo MDS do E-Foto

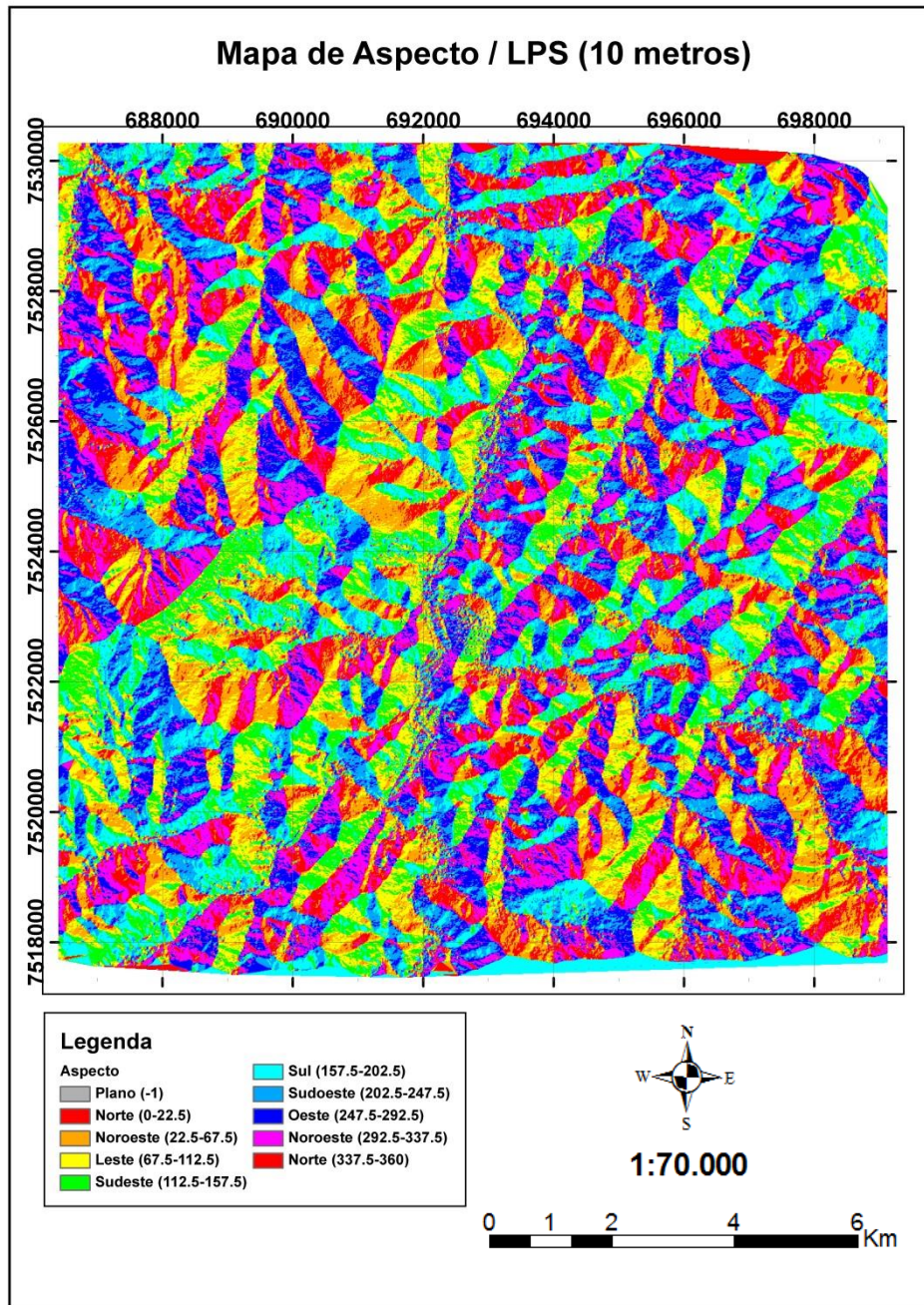


Figura 8.11 - Mapa de aspecto gerado pelo MDS do LPS

### 8.5. Mapa de Curvatura

Algumas feições geomorfológicas são consideradas unidades básicas do relevo e fundamentais para explicar o desenvolvimento das paisagens. As vertentes, que são definidas como planos de declives que divergem a partir das cristas enquadrando o vale (GUERRA, 1993) também podem ser descritas, de maneira mais simples, como um elemento da superfície terrestre inclinado em relação à horizontal, que apresenta um



gradiente e uma orientação no espaço (VELOSO, 2002), e, dessa forma, são classificadas de acordo com a sua curvatura no plano ou em perfil.

A curvatura no perfil é a taxa de variação da declividade na direção de sua orientação da vertente ou aspecto e está relacionada ao caráter do terreno que pode ser convexo, o que caracteriza um valor positivo ou côncavo, identificado por um valor negativo, sendo decisiva na aceleração ou desaceleração do fluxo da água sobre a superfície (MENDIONDO *et al.*,1998).

A curvatura no plano é a taxa de variação da declividade na direção ortogonal à da orientação da vertente ou aspecto e refere-se ao caráter divergente ou convergente do terreno e apresenta valor de curvatura nulo, o que indica uma superfície plana (MENDIONDO *et al.*,1998).

A curvatura do terreno representa a segunda derivada da altitude. Os valores das células associam-se à concavidade ou à convexidade das vertentes. A curvatura de uma vertente está relacionada com fatores, tais como: teor de água no solo, fluxo convergente/divergente e taxa de erosão/deposição (MOORE *et al.*, 1991). As vertentes côncavas, obtidas a partir do TIN, foram representadas por células com valores negativos, as convexas, por valores positivos, e as planas, por zero.

Em termos gerais, a superfície de curvatura é calculada como a derivada da declividade, ou seja, é a segunda derivada de um modelo digital de elevação. Valores razoáveis que podem ser esperados, para esses temas em uma área de relevo moderado, variam entre -0,5 e 0,5, enquanto que, para áreas com relevo mais movimentado ou montanhoso, os valores devem variar entre -4 e 4 (ESRI, 2014).

### **8.5.1. Cálculo da superfície de curvatura**

Calculada a partir do MDS para cada célula central, numa janela de 3x3 células (Figura 8.12), usando o comando *Curvature* da extensão *Spatial Analyst*, a superfície de curvatura foi classificada em regiões côncavas e convexas.

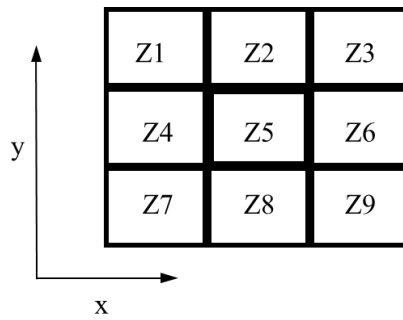


Figura 8.12 - Janela de 3x3 células

De maneira geral, para toda a área de trabalho, os valores obtidos indicam uma predominância de formas de relevo côncavo (valores negativos) sobre o convexo (valores positivos). As regiões côncavas coincidem com as linhas de drenagem (regiões convergentes), enquanto as convexas indicam os divisores topográficos (regiões divergentes). Devido ao relevo da área de interesse ser muito acidentado, foram encontrados valores entre -4 e 4, significando que os valores baixos podem ser um indicativo de riscos de inundação, enquanto que os altos indicam riscos de deslizamentos.

As Figuras 8.13 e 8.14 ilustram os mapas de curvatura gerados a partir dos modelos do E-Foto e LPS. Os valores côncavos estão representados pela cor azul, enquanto os valores convexas estão representados pela cor laranja.

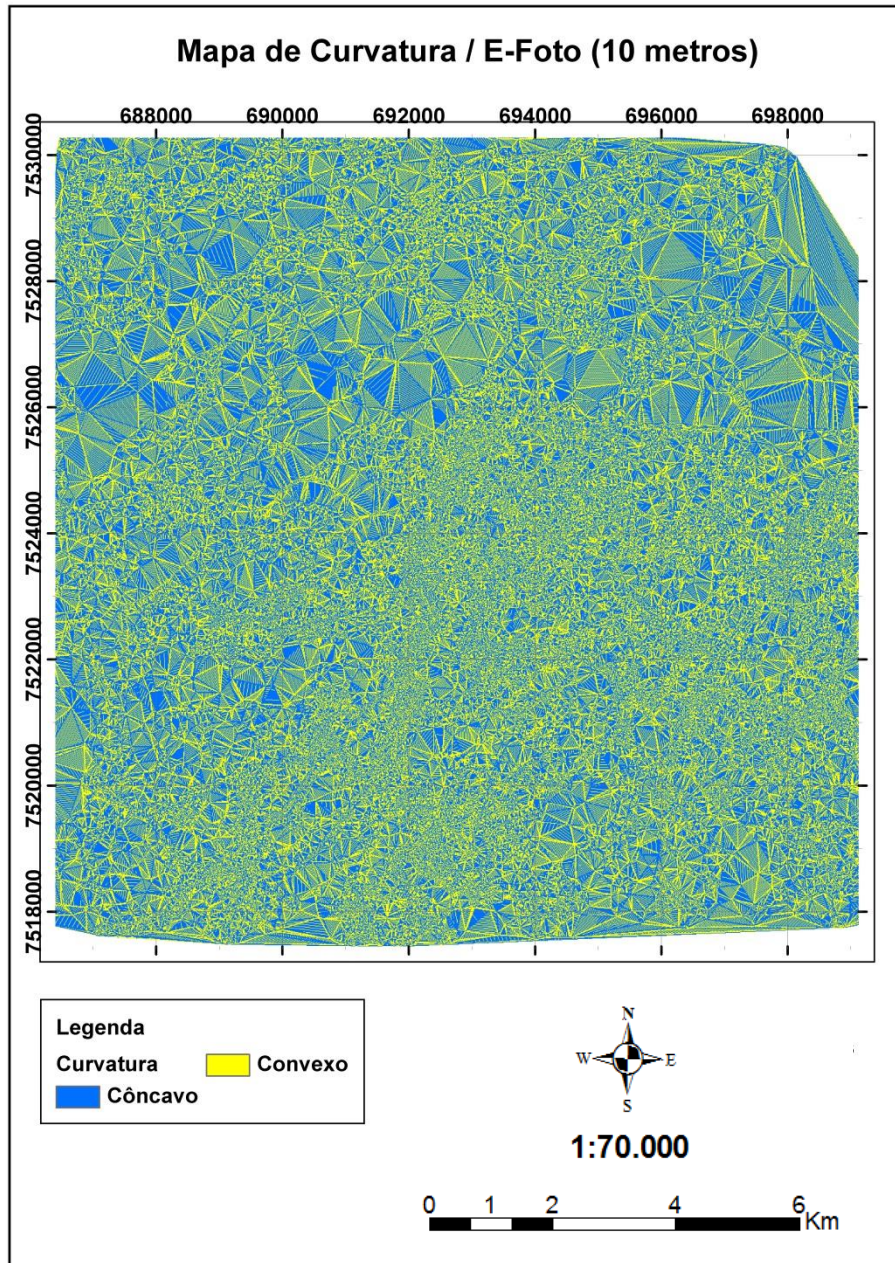


Figura 8.13 - Mapa de curvatura gerado pelo MDS do E-Foto

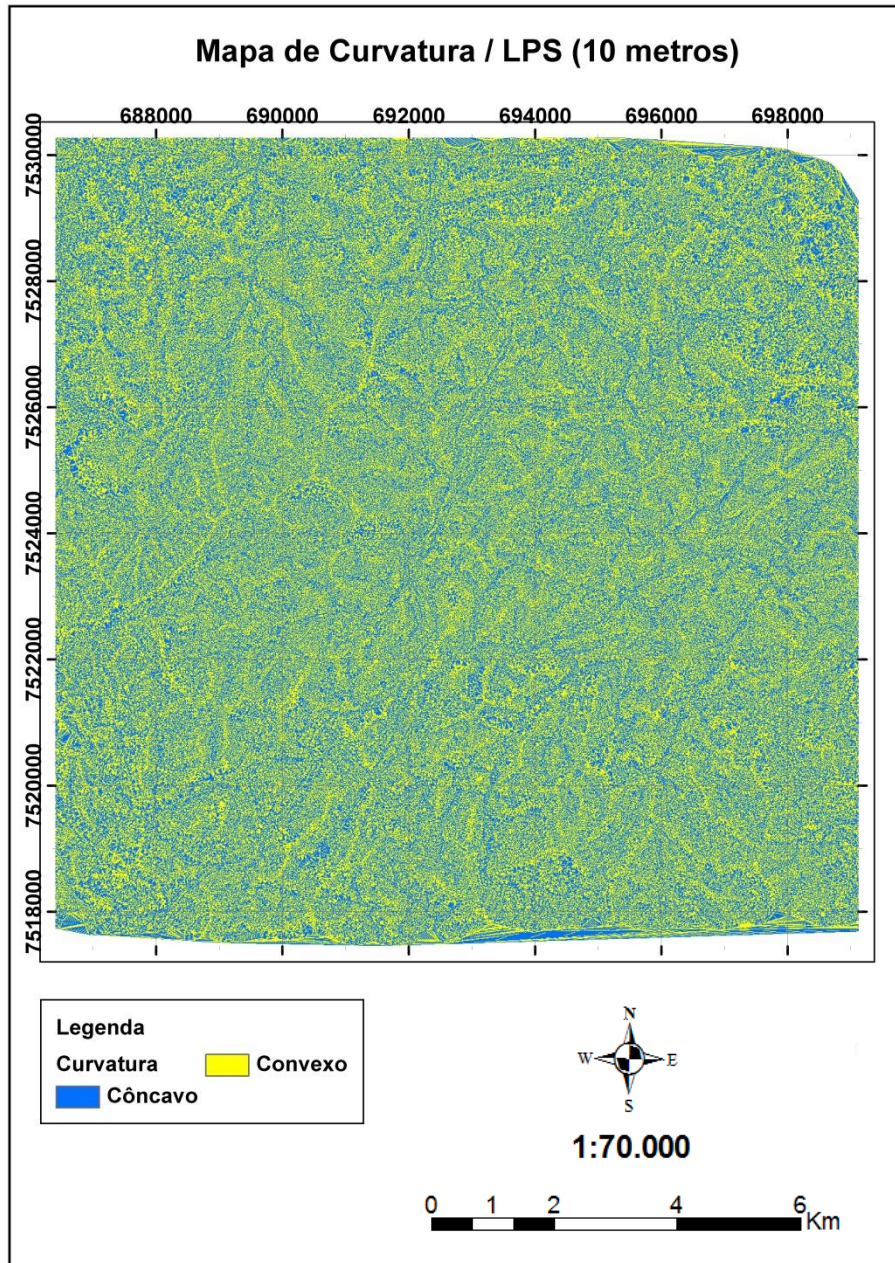


Figura 8.14 - Mapa de curvatura gerado pelo MDS do LPS

### 8.6. Delimitação de bacias hidrográficas

No Brasil, a Lei Federal 9.433/97 estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial para aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). A fixação dessas unidades básicas envolve a abrangência de aplicação dos instrumentos da PNRH, tais como: enquadramento dos corpos de água, outorga e cobrança pelo uso de recursos hídricos. Assim, padronização e automatização do traçado de bacias hidrográficas são fundamentais para a efetivação adequada da PNRH, evitando-se possíveis conflitos de utilização dos recursos hídricos (SOBRINHO *et al.*,2010).



Muitas técnicas de delimitação automática de bacias hidrográficas têm sido aperfeiçoadas e desenvolvidas em inúmeros estudos. As técnicas, normalmente, são implementadas em ambientes de sistemas de informações geográficas (SIG), fomentando resultados relevantes, conforme é apresentado nos trabalhos de TURCOTTE *et al.* (2001), VOGT *et al.* (2003), JORDAN e SCHOTT (2005) e MERKEL *et al.* (2008).

Neste processo de delimitação automática de bacias hidrográficas no ArcGIS, foram utilizadas informações de relevo representadas pelo modelo digital de superfície, que é a estrutura numérica de dados correspondente à distribuição espacial da altitude e da superfície do terreno. Os modelos que foram utilizados aqui foram extraídos do processo fotogramétrico digital (E-Foto, LPS e IBGE) e através de imagens de sensores remotos (SRTM).

Segundo JENSON e DOMINGUE (1988), os parâmetros hidrológicos extraídos de um MDS mostram-se acurados e compatíveis com aqueles obtidos por métodos manuais, que despendem maior tempo no seu processamento e têm detalhamento menor na sua configuração.

O MDS apresenta boa correlação entre a declividade e a área de contribuição, exibindo os pontos de inflexão que marcam o início da captação fluvial, de modo que a rede de drenagem pode ser determinada com confiança elevada (TARBOTTON *et al.*, 1991; WALKER e WILGOOSE, 1999).

### **8.6.1. Cálculo da delimitação da bacia hidrográfica**

O processo de delimitação automática da bacia hidrográfica foi desenvolvido no ArcGIS utilizando as extensões *spatial analyst* e *hydrology modeling*.

A metodologia utilizada nesse processo foi dividida em quatro etapas, descritas como segue: remoção das depressões (*fill sinks*), direção de fluxo (*flow direction*), fluxo acumulado (*flow accumulation*) e finalmente delimitação da bacia (*watershed*). Foram utilizados os modelos do E-Foto e LPS com 90 metros de resolução para uma comparação com o MDS da SRTM.

O MDS, normalmente, apresenta depressões de origem artificial, como erros nos processos de obtenção, ou natural, como lagos ou sumidouros. As depressões artificiais são muito comuns e normalmente ocorrem por uma insuficiência da resolução da grade

de células em representar o terreno e por deficiências da função interpoladora. Nesse contexto, uma depressão é a célula ou grupo de células que não encontra saída para o fluxo da água por gravidade, isto é, uma célula ou grupo de células que está cercada por vizinhas mais elevadas em todo o contorno (MENDES, 1995).

Como essas depressões representam obstáculos à determinação das direções de fluxo, já que, ocorrendo uma célula onde todas as suas vizinhas são mais altas, o que caracteriza uma depressão, surge a momentânea impossibilidade de definição do sentido de fluxo. A obtenção de direções de fluxo, descrita adiante, é prejudicada quando num MDS existem depressões. Para parâmetros como declividade, aspecto contínuo, curvaturas e sombreamento, as depressões não representam problemas.

As falhas no MDS advindas dos dados da SRTM e IBGE são denominadas de sumidouros (*sinks*) e caracterizam-se por áreas rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, semelhantes a uma depressão. Segundo SOBRINHO *et al.* (2010), o preenchimento dessas pequenas depressões é o primeiro tratamento dado à matriz de altitudes (Figura 8.15). Essas depressões (ou *sinks*) são consideradas obstáculos ao escoamento durante a aplicação de modelos hidrológicos, sedimentológicos e de poluentes de origem difusa.

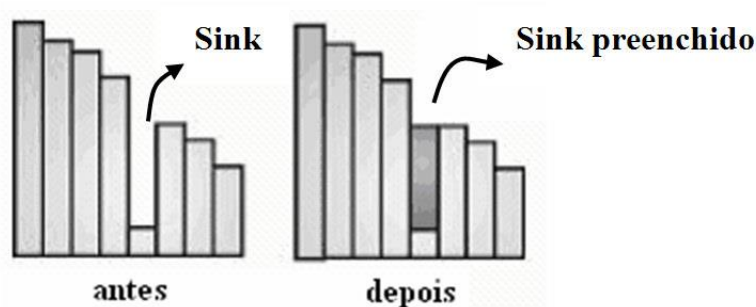


Figura 8.15 - Correção de erros do tipo *sink*  
Fonte: SOBRINHO (2010)

Foram realizadas as correções no MDS através da função *fill sinks*, na extensão *spacial analyst*, encontrada na caixa de ferramentas *hydrology*, que considera as altitudes dos píxeis vizinhos para remover as depressões espúrias (*sinks*), promovendo, assim, a geração do mapa de MDS com melhor consistência (Figura 8.16).

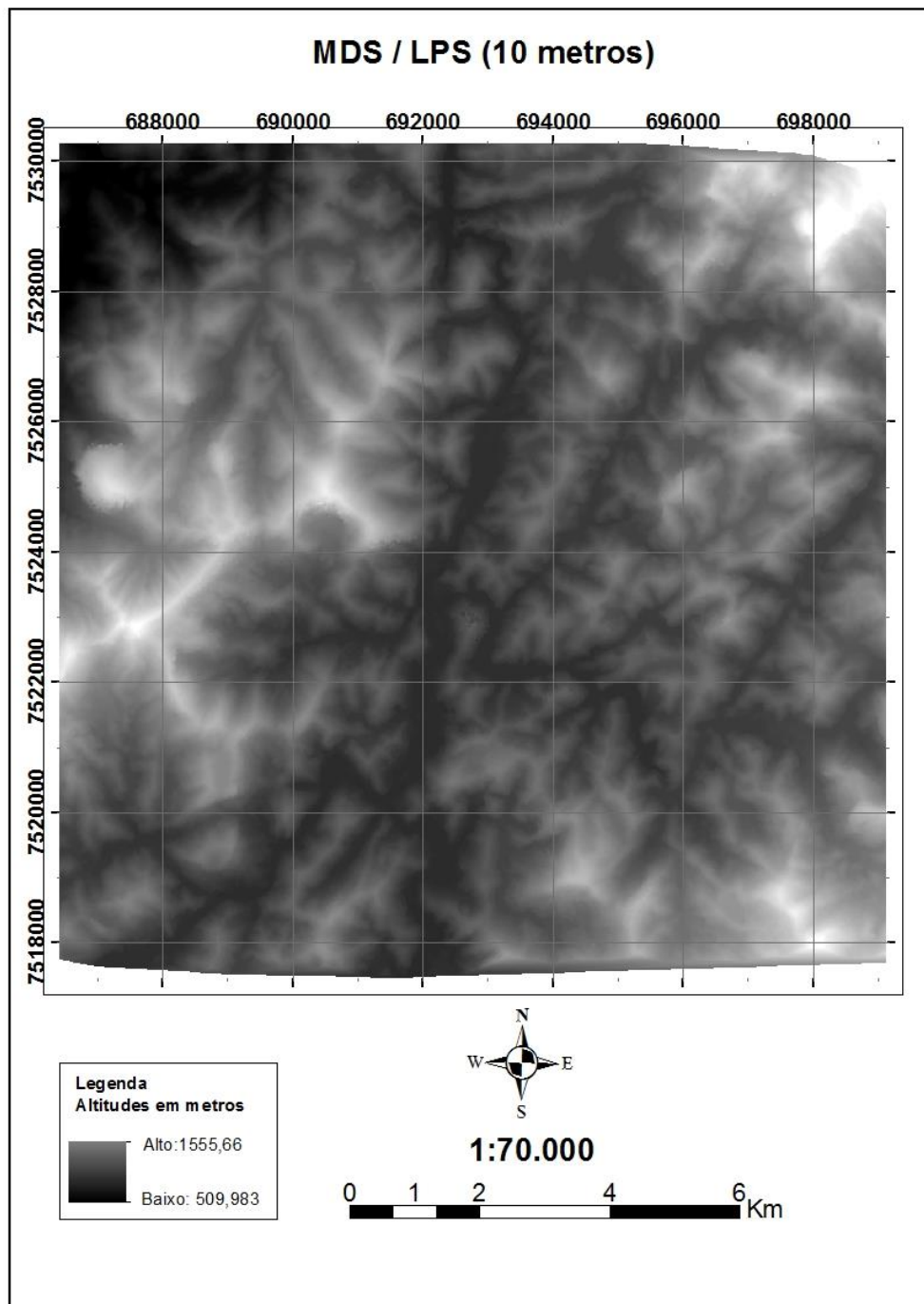


Figura 8.16 - Mapa do MDS do LPS obtido após o tratamento de dados



### 8.6.1.1. Direção de fluxo (*flow direction*)

De acordo com SOBRINHO *et al.* (2010), a direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir.

Na rede de drenagem, a direção de fluxo de água é obtida através da função *flow direction*, que gera uma grade regular definindo as direções de fluxo, tendo como base a linha de maior declividade do terreno.

Segundo SOBRINHO *et al.* (2010), a nova grade numérica gerada determina a direção de maior declividade de um píxel em relação a seus oito píxeis vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água percorrerá após atingir cada píxel, que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção (Figura 8.17).

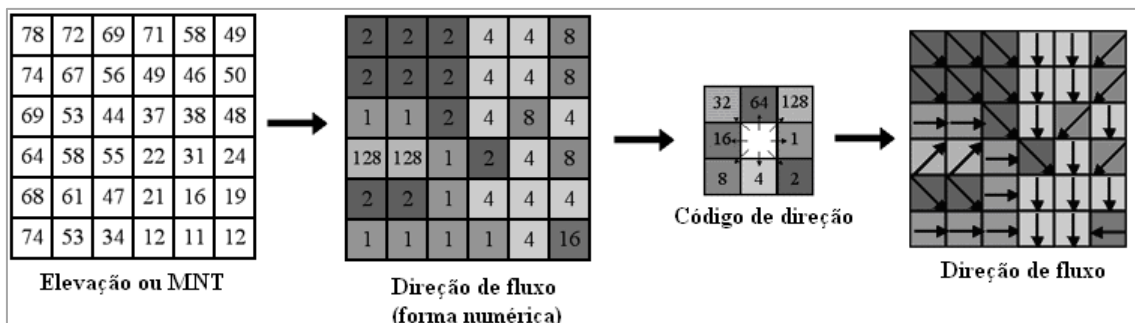


Figura 8.17 - Exemplo de execução da função *flow direction*

Fonte: adaptado de ESRI (2014)

Com o MDS já corrigido pela função *fill sinks* e executada a função *flow direction*, foi obtido o mapa de direção de fluxo apresentado na Figura 8.18, que possibilita a observação da direção do escoamento de água nas vertentes, além da visualização do relevo.

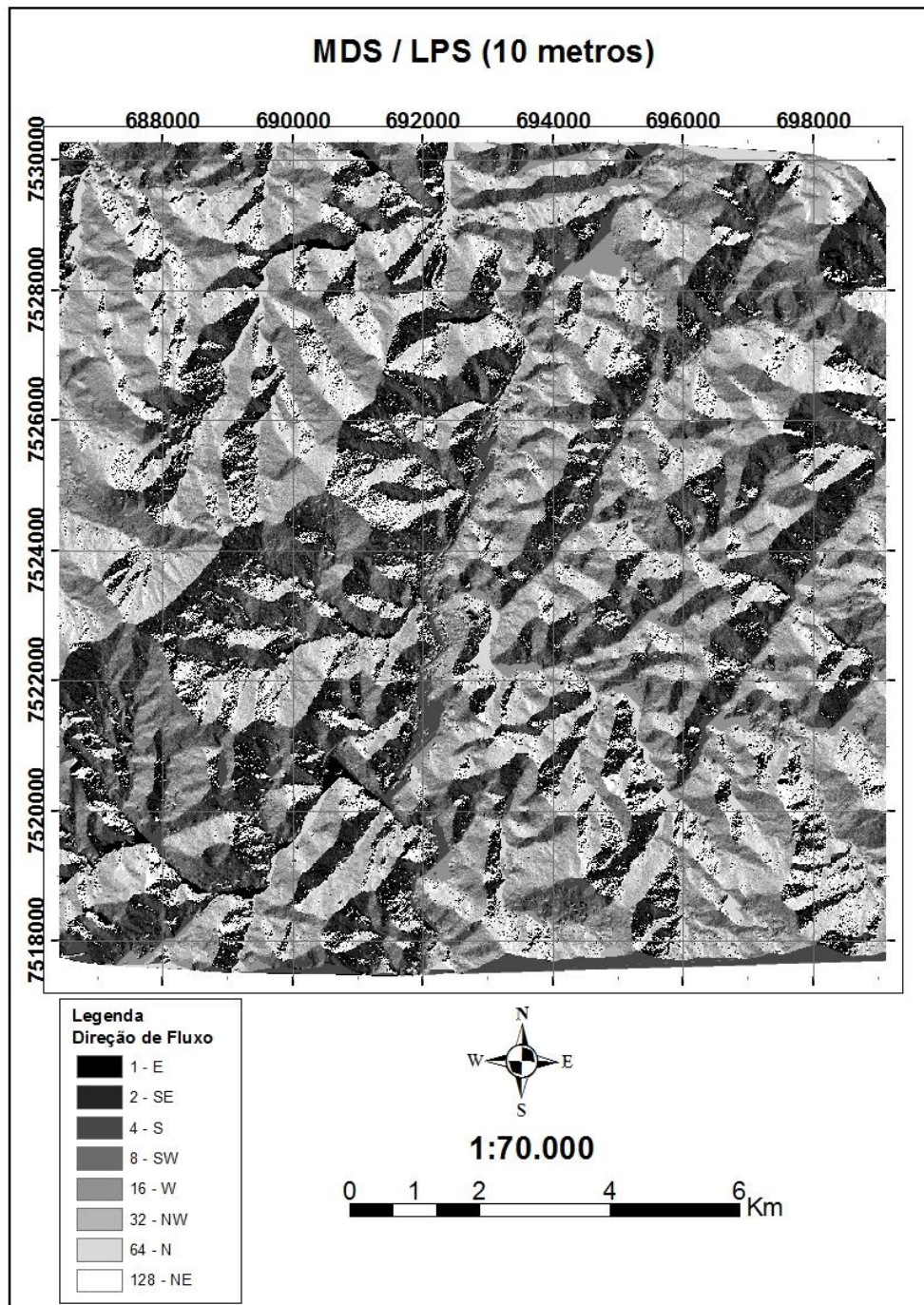


Figura 8.18 - Mapa de direção de fluxo

#### 8.6.1.2. Fluxo acumulado (*flow accumulation*)

De acordo com VALERIANO (2008), o fluxo acumulado é um parâmetro que indica o grau de confluência do escoamento e pode ser associado ao fator comprimento de rampa aplicado em duas dimensões. O fluxo acumulado, também denominado área de captação, apresenta obtenção complexa, manual ou computacional, uma vez que reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de

água a montante), também a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo).

Na Figura 8.19, exemplifica-se o fluxo acumulado, sendo possível observar a formação dos caminhos preferenciais de fluxo que originam a rede hidrográfica.

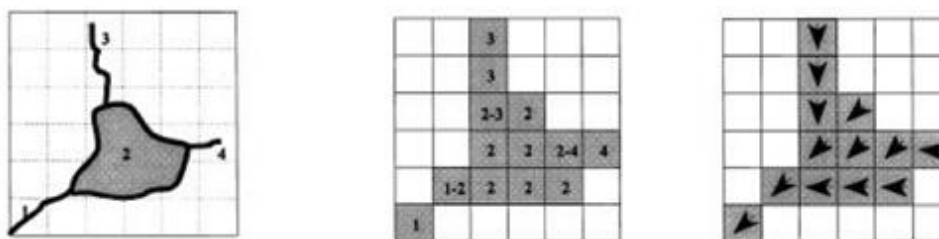


Figura 8.19 - Determinação do fluxo acumulado

Fonte: SOBRINHO (2010)

A partir da grade regular gerada, conforme descrito no item anterior, o fluxo acumulado foi obtido pela função *flow accumulation*.

O fluxo acumulado representa a rede hidrográfica (Figura 8.20), sendo possível montar nova grade contendo os valores de acúmulo de água em cada píxel. Desse modo, cada píxel recebe um valor correspondente ao número de píxeis que contribuem para que a água chegue até ele (MENDES e CIRILO, 2001).

O fluxo acumulado é obtido somando-se a quantidade de células (área das células) na direção do fluxo (ou escoamento) a partir da direção de fluxo.

### 8.6.2. Delimitação de Bacias Hidrográficas na Área de Estudo

Percorrendo-se os procedimentos descritos nos itens anteriores, foi possível a delimitação de bacias, utilizando o processamento dos mapas de direção de fluxo e fluxo acumulado na função *watershed*. Nesta dissertação, foi utilizada a área de estudo, inserida na bacia hidrográfica do Piabanha para tal procedimento.

Como dados de entrada, foram usados os modelos digitais de superfície do E-Foto e LPS, todos com 90 metros, e SRTM, além dos pontos de fechamento das bacias as quais se deseja delimitar.

Pelas Figuras 8.20, 8.21 e 8.22, foi possível fazer uma análise visual das três bacias hidrográficas geradas e delimitadas em cada modelo, denominadas de 5, 6 e 10. Essas bacias foram escolhidas com o intuito de se ter uma bacia na área mais ao norte,

onde os modelos, principalmente, o E-foto, obteve os piores resultados. A segunda região situa-se em uma área intermediária, ou seja, mais ao centro do modelo, e, por fim, uma terceira na área mais ao sul, onde os resultados foram melhores.

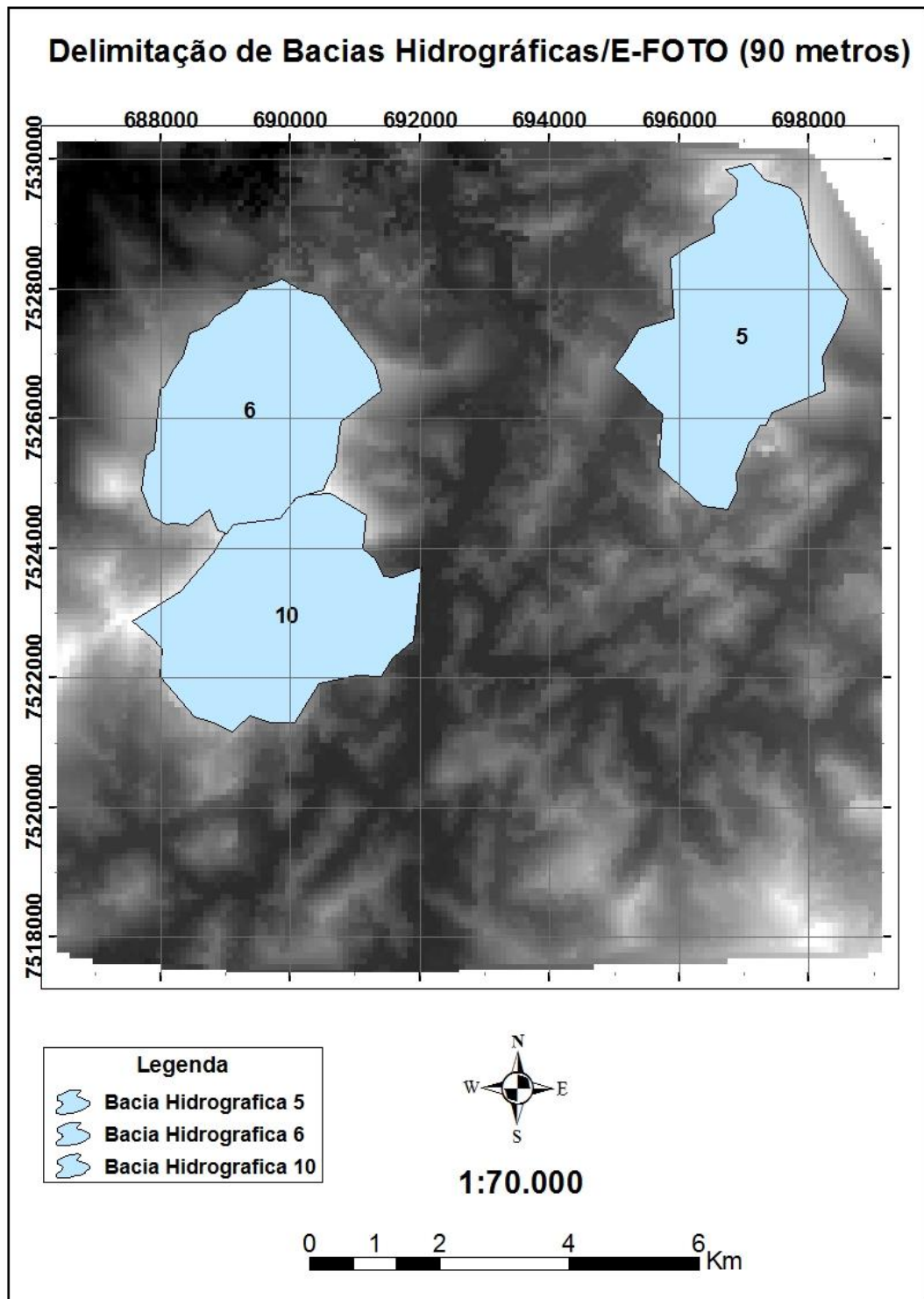


Figura 8.20 - Bacias delimitadas utilizando o MDS do E-Foto com 90 metros de espaçamento de grade



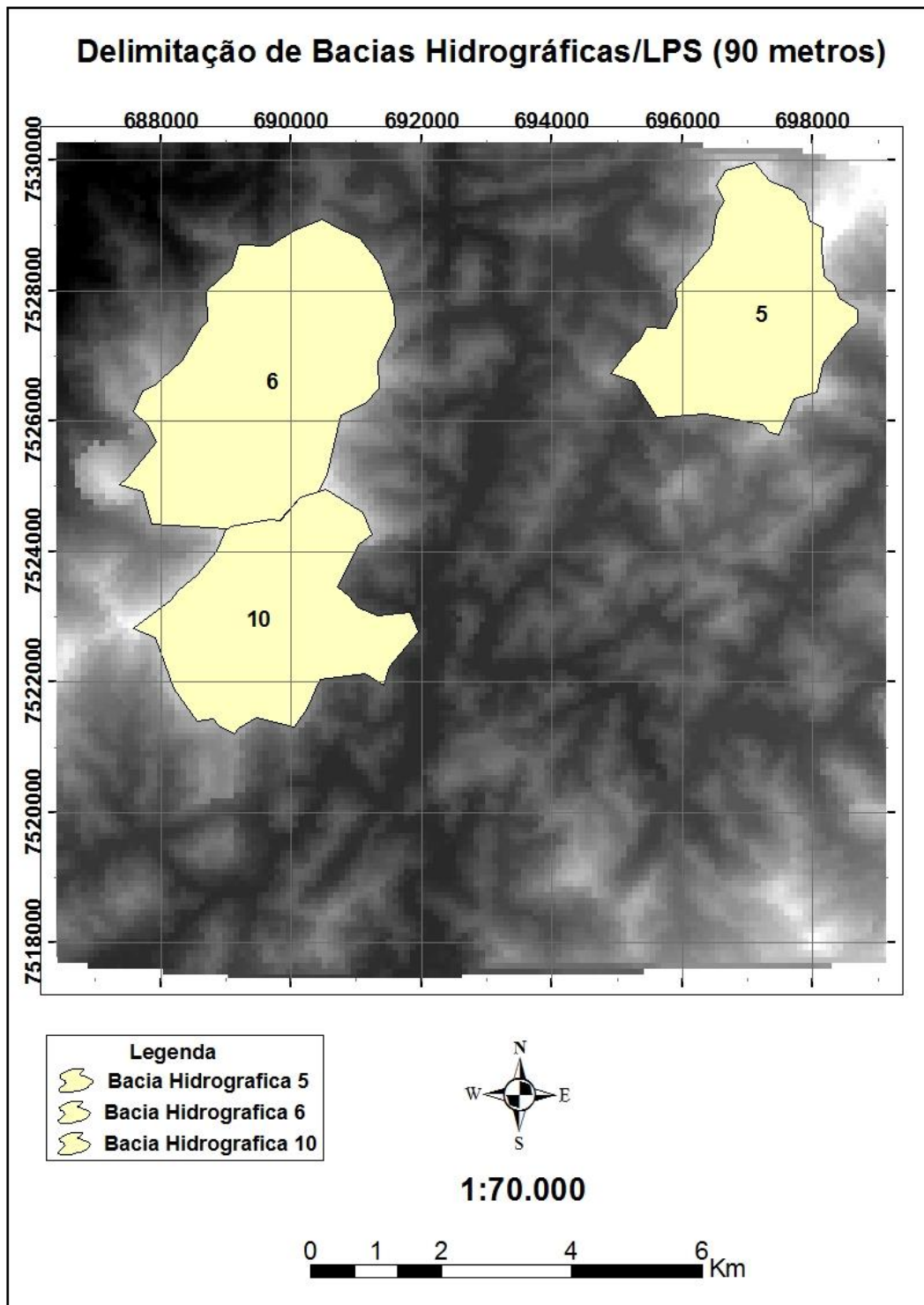


Figura 8.21 - Bacias delimitadas utilizando o MDS do LPS com 90 metros de espaçamento de grade

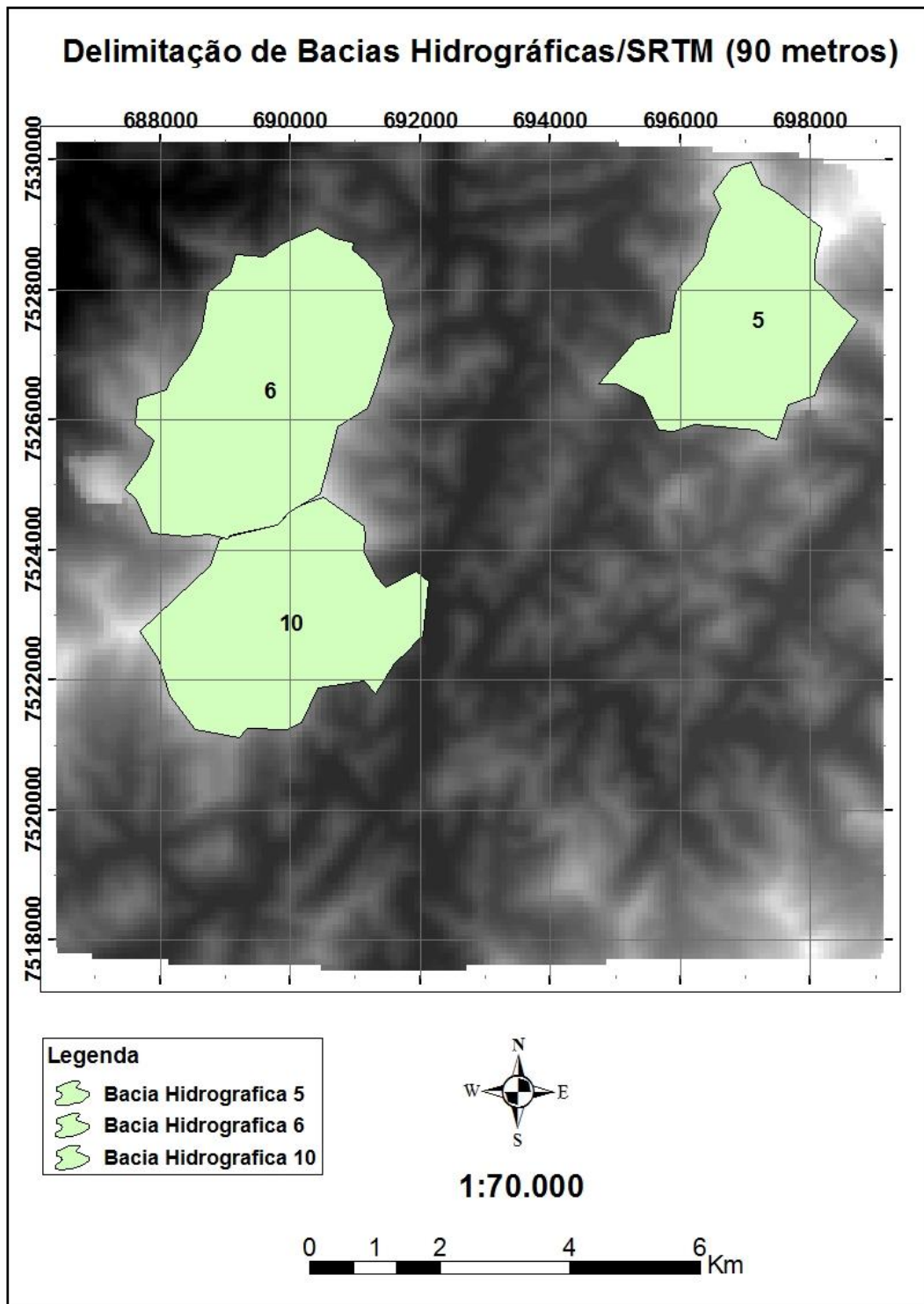


Figura 8.22 - Bacias delimitadas utilizando o MDS da SRTM com 90 metros de espaçamento de grade

Com as áreas das bacias geradas calculadas no ArcGIS, foram feitas subtrações entre elas, com o intuito de se obter o percentual em relação área de interesse, como mostra a Tabela 8.2.

Tabela 8.2 - Diferenças em entre as bacias geradas pelos modelos da SRTM , LPS e E-Foto

Bacias Hidrográficas	Área dos Modelos (km <sup>2</sup> )			Diferenças (%)		
	SRTM	LPS	E-Foto	SRTM x LPS	SRTM x E-Foto	E-Foto x LPS
Nº						
5	8,61	8,42	10,05	2,23	16,71	19,38
6	12,46	12,47	9,47	0,07	23,97	24,03
10	9,95	8,91	9,88	10,44	0,72	10,86

Pela Tabela 8.2, pode-se concluir que os modelos do LPS e SRTM possuem diferenças de aproximadamente 2% na bacia 5, enquanto que, na bacia 6, a diferença foi muito pequena, apenas 0,07%. Por outro lado, na bacia 10, ocorreu a maior diferença que chegou a 10,44%.

Na comparação entre o SRTM e o E-Foto, as diferenças ficaram bem maiores. Destacam-se as bacias 5 e 6 com diferenças de respectivamente 16,71% e 23,97%, todavia a bacia 10 obteve uma diferença menor do que 1%.

Quando comparados os modelos do E-Foto e LPS, nota-se que as diferenças foram bem grandes, com valores que chegaram a 24% na bacia 6. As bacias 5 e 10 tiveram erros altos, porém inferiores àqueles encontrados na bacia 6.

No próximo capítulo, finda a apresentação dos resultados finais desta dissertação, apresentam-se os registros de conclusão e de recomendação deste trabalho.



## CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de extrair modelos digitais de superfície (MDS) por meio de duas estações fotogramétricas digitais (EFD), sendo uma comercial, o LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), e a outra livre, o E-Foto, para a bacia do rio Piabanha, localizada na região serrana do estado do Rio de Janeiro, de modo que pudesse ser obtido um MDS capaz de ser utilizado para diversas finalidades.

Em particular, buscou-se uma alternativa ao MDS da imagem SRTM, usualmente utilizada nos estudos hidrológicos mais recentes com vistas a efetuar o balanço hídrico e de energia na escala da bacia hidrográfica. Permite-se, assim, melhor fundamentar a condução de uma análise de sensibilidade quanto a potenciais alterações nos subprodutos, especialmente de natureza hídrica e ambiental, conseqüentes da aplicação de modelos digitais de superfície.

Para cumprir o escopo proposto, empregaram-se dados de trabalhos de campo e gabinete oriundos do IBGE e da CPRM. Além do uso dos programas LPS e E-Foto, para a extração dos modelos digitais de superfície, e do ArcGIS, para avaliação dos modelos digitais gerados, utilizou-se um MDS de referência. Neste trabalho, adotou-se o MDS do IBGE e pontos de campo como referência de qualidade.

Diante do exposto, apresenta-se, na seqüência, conjunto de considerações finais do trabalho, discriminadas em conclusões e recomendações.

### 9.1. Conclusões

Inicialmente, observe-se que a área de estudo escolhida para as comparações entre os modelos reúne as piores condições possíveis operacionais para as estações fotogramétricas digitais, visto que é uma região onde a variação topográfica é elevada, associada a uma cobertura vegetal de mata nativa mesclada com área urbana e agrícola.

Ao longo do processo fotogramétrico, o E-Foto, mesmo sem as facilidades do LPS, conseguiu cumprir todas as etapas até a geração de uma nuvem de pontos, em formato texto, para a exportação, estruturação e extração do MDS no ArcGIS. Já o LPS como já esperado, por se tratar de um programa já consagrado no mercado, cumpriu um bom desempenho em todo o processo, principalmente na exportação em formato de associação com a forma (*shape*) das nuvens de pontos já estruturadas.

É importante ressaltar que o objetivo desta dissertação foi a avaliação dos produtos gerados pelas estações fotogramétricas digitais e não propriamente a avaliação direta desses equipamentos. Tanto o LPS como o E-Foto foram um meio para o desenvolvimento de um estudo de caso na bacia do rio Piabanha para demonstrar a exequibilidade de usar os processos fotogramétricos nos estudos de uma bacia hidrografia, ou seja, o potencial de resposta do MDS para esse tipo de estudo.

Uma vez no ambiente ArcGIS, os modelos digitais de superfície foram estruturados em TIN com duas resoluções diferentes. A primeira alternativa estabeleceu o espaçamento de 10 metros entre os pontos da grade, denominada E-Foto e LPS de 10 metros, enquanto a segunda fixou o espaçamento de 90 metros entre os pontos da grade, denominada E-Foto e LPS de 90 metros.

Os dois primeiros procedimentos (E-Foto e LPS de 10 metros) foram comparados com o MDS do IBGE, que possui a mesma resolução de 10 metros, obtendo-se resultados bem distintos. A comparação deu-se através de análises visuais e numéricas, podendo perceber-se que o desempenho do E-Foto na região mais ao norte não foi tão boa quanto na região sul. Foram encontradas diferenças altimétricas acima de 40 metros, o que corresponde a 33% de toda a área. Por outro lado, o desempenho do LPS foi mais regular em toda a área, uma vez que, em 45,72% de toda a área, foram aferidas diferenças que não ultrapassaram os cinco (5) metros. A exemplo do que aconteceu com o E-Foto, o LPS também indicou as maiores diferenças altimétricas na região norte na contraste com o modelo de referência.

Na comparação com modelos gerados em condições próximas por parte do IBGE e do LPS, há de se considerar que o programa E-Foto obteve resultados inferiores aos dois, como ficou claro nas análises visuais e numéricas realizadas no Capítulo 7. Nesse sentido, há a indicação de que são necessários mais testes em áreas de dificuldade igual ou até mesmo superior, podendo vir a serem adotadas metodologias diferentes de extração do MDS.

Sendo assim, os resultados apresentados para o E-Foto, ao mesmo tempo em que apontam a necessidade de um trabalho adicional, são também encorajadores, pois foi possível a comparação de uma solução desenvolvida em um código computacional (*software*) livre com uma solução oriunda de código computacional comercial.

Os outros dois modelos gerados na resolução de 90 metros foram, então, comparados com o MDS da imagem SRTM, ficando evidente a vantagem tanto do MDS do LPS, como do MDS do E-Foto. O MDS da SRTM foi superado, na comparação, tanto pelo E-Foto como pelo LPS, o que indica, juntamente com as análises no próprio modelo, que, dependendo da escala e do objetivo do trabalho, o MDS da SRTM pode ser usado como base cartográfica para aplicações em hidrologia.

Na avaliação que comparou os pontos de campo e as coordenadas das RRNN com os seus homólogos nos modelos gerados pelo processo fotogramétrico, ficou nítida a vantagem do LPS em relação ao E-Foto na produção dos modelos com 10 metros. Já para os modelos de 90 metros, não se obteve o mesmo desempenho, o LPS foi superior ao E-Foto e a SRTM na comparação com os pontos de campo, porém obteve um desempenho inferior ao E-Foto e SRTM na comparação com as referências de nível (RRNN), vértice de triangulação (VT) e estação GPS SAT (SAT). O que como estratégia de cálculo foi chamada apenas de RRNN.

Foi possível utilizar os modelos digitais de superfície com resolução de 10 metros, do LPS e do E-Foto, para aplicações em hidrologia, o que mostra, mais uma vez, que o objetivo desta dissertação foi alcançado com êxito.

A precisão altimétrica dos modelos e a resolução espacial são características fundamentais para uma correta utilização do MDS em estudos hidrológicos. As variáveis como declividade, perfil longitudinal e área de bacias podem ter seus valores alterados consideravelmente dependendo do MDS utilizado.

Por fim, foi possível, com cada MDS gerado por meio das duas estações fotogramétricas digitais, sendo uma o LPS e a outra o E-Foto, delimitar três (3) bacias hidrográficas dentro da área de estudo.

Quando os MDS's de 90 metros do LPS, do E-Foto e da SRTM foram utilizados para a delimitação das bacias hidrográficas dentro da área de interesse, encontraram-se diferenças da ordem de até 25%. Ressalta-se, assim, a grande importância da qualidade do MDS quando necessária a sua utilização em estudos hidrológicos.

Nesta dissertação, foi dado o primeiro passo nas pesquisas para avaliar, de forma mais rigorosa, um MDS na bacia do rio Piabanha/RJ, alternativo ao emprego de imagem

SRTM, usualmente utilizada, conforme previamente destacado. Há diversos processos de estimativa das componentes do balanço hídrico e de energia em uma bacia hidrografia, que, em última análise, dependem da resolução do modelo digital de superfície adotado. Dessa forma, seguem algumas recomendações para futuros trabalhos.

## 9.2. Recomendações

Neste item, listam-se alguns tópicos que carecem de estudos mais aprofundados:

- aplicar o MDS extraído na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos a partir da condução de estudos de análise de sensibilidade e de estimativa da incerteza, por exemplo, quanto às componentes do balanço de energia, notadamente do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível, do fluxo de calor no solo e da evapotranspiração;
- Comparar modelos fotogramétricos extraídos de imagens aerofotogramétricas com os correspondentes modelos extraídos de imagens em nível orbital de alta resolução;
- utilizar o MDS gerado por fotogrametria na confecção de, por exemplo, mapas de suscetibilidade a enchentes e à erosão do solo;
- avaliar o efeito do MDS no comportamento de balanço hídrico e balanço de energia em regiões florestadas, agrícolas e urbanas;
- avaliação a sensibilidade de modelos hidrológicos de natureza semidistribuída, como, por exemplo, o TOPMODEL, ou de natureza distribuída, como é o caso, a título de ilustração, do SWAT (*Soil Water Assessment Tool*), do EPHSTC-COPPE (Esquema de parametrização da Superfície Terrestre Continental) e do MGB (Modelo de Grandes Bacias);
- aplicar o MDS para o monitoramento hidrológico da umidade do solo e da temperatura de superfície do solo em aplicações diversas, como no caso do controle de pragas em atividades agrícolas, ou, de forma mais ampla, na modulação dos ciclos biogeoquímicos e de transmissão de doenças;

- investir no contínuo desenvolvimento de código computacional nacional de acesso livre, como é o caso do E-Foto, de forma a incentivar novas pesquisas e trabalhos na área de modelos digitais de superfície.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: **Digital Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Ed. Cliff Greve, Chapter 6 pp 135 – 149, 1996.
- ALVES, A. R. **Visão Estéreo – Principios da Estereoscopia e Fotogrametria**. Florianópolis: UFSC, 1999. Disponível em: [www.inf.ufsc.br/~visao/1999/aline/index.html](http://www.inf.ufsc.br/~visao/1999/aline/index.html). Acessado em março de 2014.
- ANDRADE, J. B. Fotogrametria. **SBEE**, Curitiba, 1998.
- AUGUSTO, E. G. G. **Normalização de Estereogramas e sua Aplicação na Geração de Modelos Numéricos de Elevação**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Cartográfica – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- BALDISSERA, A; OLIVEIRA, D. F. **Introdução à Modelagem digital de terreno (MDT)**. Trabalho Teórico da Disciplina de Topografia 10, Curso de Engenharia Civil, Orientação do Prof. Tarcísio Ferreira Silva, 2002.
- BAND, L. E. A. Terrain - Based Watershed Information System. **Hydrological Processes**, 3:151-162, 1989.
- BARBOSA, R. L.; SILVA, J. F. C. Geração de MDT usando fotos de pequeno formato. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 52, n. 2, p. 56-64, 2000.
- BARROS, V. R. **Avaliação da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL e imagens Landsat5-TM – estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- BRITO, J. L. N. S; PRADO, W. S; AUGUSTO, E. G. G. **Estágio de Fotogrametria Digital para Engenheiros Cartógrafos - Notas de Aula**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- BRITO, J. L. N. S; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. 196p. 1ª Ed. Rio de Janeiro, Ed UERJ, 2007.

- BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Oxford University, 1998.
- CÂMARA, G. & MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2.a Edição - Revisada e Ampliada. São José dos Campos, SP. INPE. 194p, 1998.
- COPPETEC-COPPE-UFRJ. “Projeto EIBEIX-I: Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro”. **In: Relatório Técnico Parcial 2, Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO – Bacias Representativas 04/2005**. Elaborado conjuntamente pela fundação COPPETEC-COPPE-UFRJ com colaboração do IGEO-UFRJ-UERJ-CPRM-SERLA (INEA), 2010.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laser scanner: conceitos e princípios de funcionamento**. Curitiba, UFPR, 2004. 97p.
- DE BIASI, M. **Carta de declividade de vertentes: confecção e utilização**. Geomorfologia. São Paulo, n.21, 1970. p. 8-13.
- DREWES, H.; SANCHEZ, L.; BLITZKOW, D.; FREITAS, S. (2002b). **Scientific Foundations of the SIRGAS Vertical Reference System**. In: Vertical Reference Systems (IAG Symposia, vol. 124). Springer, Ed. H. Drewes *et al.*, ISBN 3-540-43011-3, p. 297-301.
- ESRI, **User’s Guide: ArcGIS 10.2**, 2014.
- FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica de terreno. In: **Introdução à ciência da geoinformação**. 2004. Disponível em <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7\\_mnt.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7_mnt.pdf)>. Acessado em maio de 2014.
- FRANKE, R. S. **Data Interpolation: Test of Some Methods, Mathematics of Computations**, v. 33, n. 157, p. 181-200, 1982.
- FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitudes e Geopotencial. In: **Bulletin N.9, International Geoid Service (Special Issue for South America)**. IgeS, Milano, Ed. F. Sansò *et al.*, ISSN 1128-3955, p. 47-61, 1999.



- FREITAS, S. R. C.; LUZ, R. T. Altimetria de Precisão com GPS baseada no SGB: Possibilidades Físicas e Limitações. In: **4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**. SBGf, Ed. A. P. A. Barbosa et al., vol. 1, p. 135-138. Rio de Janeiro, Brasil, 1995.
- GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba: UFPR, 1999.
- GERSTENECKER, C.; LAUFER, G. L.; STEINECK, D.; TIEDE, C.; WROBEL, B. Validation of digital elevation models around Merapi Volcano, Java, Indonesia. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Perugia, v.5, n.6, p.863-876, 2005.
- GONÇALVES, R. C. **Modelagem Hidrológica do tipo chuva-vazão via SMAP e TOPMODEL - Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- Google Earth**. Acessado em março de 2014.
- GUERRA, T. A. **Dicionário Geológico e Geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro.
- HOOG, J.; MCCORMACK, J. E.; ROBERTS, S. A.; HOYLE, B. S. - Automated Derivation Of Stream-Channel Networks And Selected Catchment Characteristics From Digital Elevation Models. In: **Geographical Information Handling-Research Applications**. Ed. By P.M. Mather, Pp. 206-235, John Wiley & Sons Ltd, 1993.
- HUTCHINSON, M. F.; GALLANT, J. C. Representation of terrain In: **Longley, Paul A. Geographical information systems : principles, techniques, applications, and management**. 2ª ed. New York: John Wiley, v.1. p. 105-124, 1999.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual de Noções Básicas de Cartografia**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ. 128p, 1997.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/fig3.htm>>. Acessado em março de 2014.

- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bethesda, v.54, n.11, p.1.593-1.600, 1988.
- JORDAN, G.; SCHOTT, B. **Application of Wavelet Analysis to the Study of Spatial Pattern of Morphotectonic Lineaments in Digital Terrain Models**. Remote Sensing of Environment, New York, v.94, n.1. p.31-38, 2005.
- KLING, A. S. M. **Aplicação do Método Battelle na avaliação do impacto ambiental na Bacia Hidrográfica do rio Piabanha**. Dissertação de Mestrado. Curso na área de Saúde Pública – Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, 2005.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. 2005. Digital Terrain Modeling – Principles and Methodology. **CRC Press**.
- LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- LPS. **Manual do Usuário**.
- MCCULLAGH, M. J. Terrain and Surface Modelling Systems: Theory and Practice. **Photogrammetric Record**, v.72, n.12, p. 747-779, 1988.
- MENDES, C. A. B. Modelos Numéricos do Terreno e suas Aplicações nos Recursos Hídricos. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1995. Recife, PE.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: **ABRH**, 2001. 536 p.
- MERKEL, W. H.; KAUSHIKA, R. M.; GORMAN, E. NRCS GeoHydro A GIS Interface for Hydrologic Modeling. Computers & Geosciences, Oxford, v.34, n.8, p.918-930, 2008.
- MENDIONDO, E. M.; CASTRO, N. M. R.; AUZET, A.; CHEVALLIER, P. Surface Flow Pathways in Subtropical headwaters: a case study from Southern Brazil. In: Martin J. Haigh; Josef Krecek; G. S. Rajwar; Marianne P. Kilmartin. (Org.). Headwaters: Water Resources and Soil Conservation. 1 ed. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, v. 1, p. 285-292, 1998.

- MILLER, C; LAFLAMME, R. **The digital terrain model – theory and applications**, **Photogrammetric Engineering**, 24: 433-442, 1958.
- MOLINARI, B. S. **Avaliação da vazão ecológica do ponto de vista da qualidade das águas na bacia do rio Piabanha/RJ**. Monografia realizada para grau de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2011.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. **Digital Terrain Modeling: A Review Of Hydrological, Geomorphological And Biological Applications**. **Hydrol. Proc.**, 5:3-30, 1991.
- MOREIRA, D. M. **Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- MUNDOGEO: **Revista Online**. Disponível em: [www.mundogeo.com/blog/2003/10/15/ibge-tem-nova-ferramenta-para-mapeamento-topografico-2/](http://www.mundogeo.com/blog/2003/10/15/ibge-tem-nova-ferramenta-para-mapeamento-topografico-2/). Acessado em 23 de setembro de 2014.
- NAGHETTINI, M. C. “**A Bacia Hidrográfica**”. 2006. Disponível em: <http://www.etg.ufmg.br/tim1/bacia%20hidrografica>. Acessado em 15 de abril de 2013.
- NASA - **National Aeronautics and Space Administration**. 2014. SRTM, Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>. Acessado em 29 de agosto de 2014.
- NASER, E. S.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications**. Norwood, Artech House, 2005. 257p.
- PARADELLA, W. R.; CECARELLI, I. C. F.; LUIZ, S.; DE OLIVEIRA, C. G.; OKIDA, R. Geração de carta topográfica com estéreo-pares fine do 71 RADARSAT-1 e dados ETM+ LANDSAT 7 em ambiente de relevo montanhoso na região Amazônica (Serra dos Carajás, Pará). **Revista Brasileira de Geociências**, 33: 323-332, 2005.

- PAULA, T. P. **Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- PETRIE, G.; KENNIE, T. J. M. Terrain modelling in surveying and civil engineering. **Caithness, Whittles**, 1990.
- PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, cartas topográficas e GPS: Numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.58, n.1. p. 1-9, 2006.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, R.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, p.241-262, 2003.
- ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora, MG: Ed. do Autor, 2000.
- ROMANOWICZ, R.; BEVEN, K & MOORE, R. - Gis and distributed hydrological models.: In: **Geographical Information Handling-Research Applications**. Ed. By P.M. Mather, Pp. 206-235, John Wiley & Sons Ltd, 1993.
- ROSÁRIO, L. S. **Análise das áreas de proteção permanente com suporte de geotecnologias face a possíveis alterações no código florestal brasileiro – estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- SANTOS, C. J. B. dos; SILVA, J. F. C. da; MELLO, M. P. de. Avaliação da qualidade de Modelos Digitais do Terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados. In: **Congresso de Cartografia**. Anais. Porto Alegre. Seção Pôster, Fotogrametria, 2001.
- SEMADS. **Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses. Síntese Informativa por Macrorregião Ambiental**, Rio de Janeiro, 73p, 2001.
- SILVA, F. J. R. **Geração e Análise de Um Modelo Numérico de Elevações em Ambiente E-Foto**. Projeto Final de Curso. UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

- SILVEIRA, F. J. C. Fototriangulação pelo Método dos Feixes Perspectivos. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005, Macaé. **Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia**, 2005.
- SIMÕES, M., G., **Modeladores Digitais de Terreno em Sistema de Informação Geográfica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1993.
- Slide Player**. Disponível em : <http://slideplayer.com.br/slide/380247/>. Acessado em 03 de outubro de 2013.
- Slide Player**. Disponível em <http://slideplayer.com.br/slide/1863812/>. Acessado em 18 de janeiro de 2014.
- SMITH, J. R. Introduction to Geodesy: the history and concepts of modern geodesy. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: **Wiley Interscience publication**, 1996. 224 p, 1996.
- SOBRINHO, T. A. *et al.* Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas utilizando dados SRTM. Artigos Científicos Engenharia de Água e Solo. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, jan./fev, 2010.
- SOUZA, E. C. B. Análises temporais de alta precisão utilizando GPS para avaliação das variações volumétricas ocorridas no ISTMO da Ilha do Mel. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2002.
- SURFER. **User's Guide**. Golden Software Inc. USA. 1999.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ, I. I. **On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data**. Hydrological Processes, Chichester, v.5, n.1, p.81-100, 1991.
- TARIFA, J. R. *et al.* “O USO DO SOLO E A QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA DO RIO VERMELHO NO SUDESTE DE MATO GROSSO”. In: **XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Anais. São Paulo, USP. p. 5113 – 5122, 2005.

- TSAI, S. M.; BONETTI, R. **Response to inoculation and N fertilization for increased yield and BNF of common bean.** *Plant and Soil*, v.152, 1993.
- TURCOTTE, R.; FORTIN, J. P.; ROUSSEAU, A. N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J. P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v.240, n.3, p.225-242, 2001.
- LPS. **User's Guide.** LPS Project Manager. 2014.
- VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). *Geomorfologia, conceitos e tecnologias atuais.* São Paulo: **Oficina de Textos**, 2008.
- VASCONCELLOS, J. C. P. **Tecnologia GPS.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: The concepts.** 2.ed. North Holland/Elsevier, Amsterdam, 1986.
- VELOSO, A. J. G. **Importância do Estudo das Vertentes.** *GEOgraphia*. V.8, n.8, 2002.
- VIESSMANN; KNAPP; HARBAUGH. **Introduction to hydrology**, 2<sup>a</sup> ed, New York, Harper and Row, 1977.
- VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. **Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics.** *Geomorphology*, Amsterdam, v.53, n.3, p.281-298, 2003.
- WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. On the Effect of DEM Accuracy on Hydrology and Geomorphology Models. **Water Resource Research**, Washington, v.357, n.7, p.2.259-2.268, 1999.
- WATSON, D. F. Nngridr: An implementation of Natural Neighbor Interpolation, **Vol. 1 in the Natural Neighbor Series**, Published by David Watson, P.O. Box 734, Claremont, WA 6010, Australia, p.170, 1994.

WOLOCK, D. M.; MCCABE, G. J. Comparison of single and multiple flow-direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL: **Water Resources Research**, v.31, p.1315-1324, 1995.

ZANARDI, R. P. **Geração de Modelo de Terreno a partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas**. Dissertação de Mestrado. UFRS Porto Alegre, RS, Brasil, 2006.

ZHANG, W., MONTGOMERY, D. R. "Digital elevation model grid size landscape representation and hydrologic simulations". **Water Resources Research**, 30, pp. 1019-1028, 1994.



# ANEXO A - Certificado de Calibração da Câmara

SP1 + SP2 (CESTE)

## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARA AÉREA

### 1.0 CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA

Fabricante : CARL ZEISS OBERKUCHEN  
Tipo de Câmera : RMK TOP 15  
Número de Série : 145856  
Tipo de Lentes : PLEOGON A3  
Número de Série : 143100  
Dimensão do Quadro do Negativo : 230mm x 230mm  
Máxima Abertura Focal : f/4  
Tipo de Cone : Grande Angular  
Distância Focal Nominal : 153,000mm

### 2.0 INFORMAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO

Método de Calibração : Campo Tridimensional  
Campo de Teste : Localizado em São Luiz do Purunã Pr.  
Tomada das Aerofotos : Realizado pela Empresa BASE em 04/08/2002  
Autorização de Voo : Autorização M.D. Nº 120/02 de 26 de Junho de 2002  
Escala Média das Aerofotos : 1/12.000  
Número de Fotos : 12  
Número de Alvos Utilizados : 38  
Número de Imagens : 355  
Graus de Liberdade : 537  
Filme Utilizado : Kodak Aerocolor Film 2444  
Filtro Utilizado : Filtro KL  
Aparelho Fotogramétrico Utilizado : Zeiss - Planicomp C-100  
Discriminação do Aparelho : 1 Milimilímetro



Eng. Edson A. Mitschka - CREA 32.187  
Responsável pela Calibração  
Data da Calibração : 29 de Agosto de 2002

4 4 8  
L. 13.228/06  
FUNDAÇÃO  
SELO DE AUTENTICAÇÃO  
NOTARIAL  
Município de Uberaba - MG  
Distrito de Uberaba - MG  
Número de Registro: 1033AA167912  
Assinatura por testemunha (s) firmada de:  
Edson Mitschka  
29 agosto 2002  
AYDÉE SANTOS LOPES - Escrevente  
CRISTIANE MANKA - Escrevente  
MARISTELA LADA - Escrevente  
MARILENE MACHADO FREITAS - Escrevente

### 3.0 PARÂMETROS DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO

Distância Focal Gaussiana Equivalente :

$$C = 152,788 \text{ mm } +/- 0,046 \text{ mm}$$

Distância Focal Calibrada :

$$C' = 152,749 \text{ mm}$$

Coordenadas do Ponto Principal no Referencial Fiducial :

$$x_0 = -0,075 \text{ mm } +/- 0,010 \text{ mm}$$

$$y_0 = 0,069 \text{ mm } +/- 0,010 \text{ mm}$$

Coefficientes de distorção Radial Simétrica :

$$K_0 = 2,55121951E-04$$

$$K_1 = -3,68953156E-08 \text{ mm}^{-2} +/- 1,0560806E-08 \text{ mm}^{-2}$$

$$K_2 = 2,19934055E-12 \text{ mm}^{-4} +/- 1,0525106E-12 \text{ mm}^{-4}$$

$$K_3 = -5,71595694E-17 \text{ mm}^{-6} +/- 3,3061390E-17 \text{ mm}^{-6}$$

Coefficientes de Distorção Descentrada :

$$P_1 = 1,47767361E-07 \text{ mm}^{-2} +/- 8,0585057E-08$$

$$P_2 = 4,41053931E-07 \text{ mm}^{-2} +/- 9,8398437E-08$$

Parâmetro de Correção da Refração Fotogramétrica :

$$\epsilon_{45/12.000} = -3,57995304E-04 +/- 2,50123560E-05$$



### 4.0 VALORES MÉDIOS DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA

r (mm)	0	10	20	30	40	50	60	70
δr (mm)	0,000	0,002	0,005	0,007	0,008	0,009	0,009	0,008
r (mm)	80	90	100	110	120	130	140	150
δr (mm)	0,007	0,006	0,005	0,003	0,001	-0,002	-0,007	-0,017



Eng. Edson A. Mitishita - CREA 32.187  
Responsável pela Calibração

Data da Calibração : 29 de Agosto de 2002

Atestamos por semelhança de( s) firma(s) de Edson A. Mitishita

SELO DE AUTENTICAÇÃO

NOTAR

MARISTELA LADA DE OLIVEIRA

AYDEE SANTOS LOPES - Escrevente

CRISTIANE MANIKA - Escrevente

MARISTELA LADA - Escrevente

MARILENE VARCHAKI FREITAS - Escrevente

**5.0 FÓRMULAS DE CORREÇÃO DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA EM COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS**

$$\delta x = (K'_0 + K'_1 r^2 + K'_2 r^4 + K'_3 r^6)x$$

$$\delta y = (K'_0 + K'_1 r^2 + K'_2 r^4 + K'_3 r^6)y$$

$$x' = x - \delta x$$

$$y' = y - \delta y$$

[ x' y' ] : Coordenadas Fotogramétricas Corrigidas da Distorção Radial Simétrica

**6.0 FÓRMULAS DE CORREÇÃO DA DISTORÇÃO DESCENTRADA EM COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS**

$$\delta'x = P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy$$

$$\delta'y = 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)$$

$$x'' = x - \delta'x$$

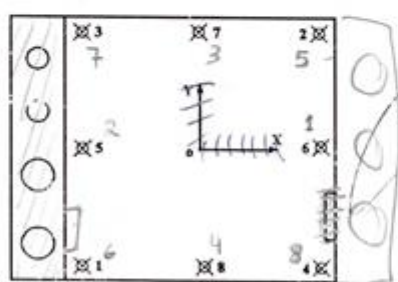
$$y'' = y - \delta'y$$

[ x'' y'' ] : Coordenadas Fotogramétricas Corrigidas da Distorção Descentrada

**7.0 POSIÇÃO DAS MARCAS FIDUCIAIS**

Representação do Plano Focal, Considerando a Câmera sendo Vista por Trás ou Negativo Visto com a Emulsão para Baixo :

Tipo I  
 +113 +113  
 +113 -113  
  
 Tipo II  
 + -  
 - +



**UBERABA**  
 Eng. Edson A. Mitishima - CRPA 32.187  
 Responsável pela Calibração  
 Data da Calibração : 29 de Agosto de 2002

Notário Público para a manutenção dos firmados.  
 Edson A. Mitishima  
 Notário Público  
 Lei 13.226 de 14/04/2001  
 FUMARINHA  
 SELO DE AUTENTICAÇÃO  
 NOTARIAL  
 MARISTELA LADA DE OLIVEIRA  
 Escrivã  
 50  
 Cópia Digitalizada  
 e Autenticada  
 em 07/04/2003  
 Aydee Santos Lopes - Escrivente  
 Cristiane Manika - Escrivente  
 Maristela Lada - Escrivente  
 Marileide Marchaki Freitag - Escrivente

Obs: Do ZEMAPPER. Confira com os arquivos de numeracao original

### 8.0 REFERENCIAL FIDUCIAL

Marca Fiducial	Coordenada x(mm)	Coordenada y(mm)
01	-113,041	-113,049
02	113,054	113,057
03	-112,947	112,942
04	112,964	-112,939
05	-112,996	-0,055
06	113,019	0,051
07	0,072	112,995
08	-0,043	-112,995

### 9.0 CURVAS DE DISTORÇÕES RADIAIS SIMÉTRICAS



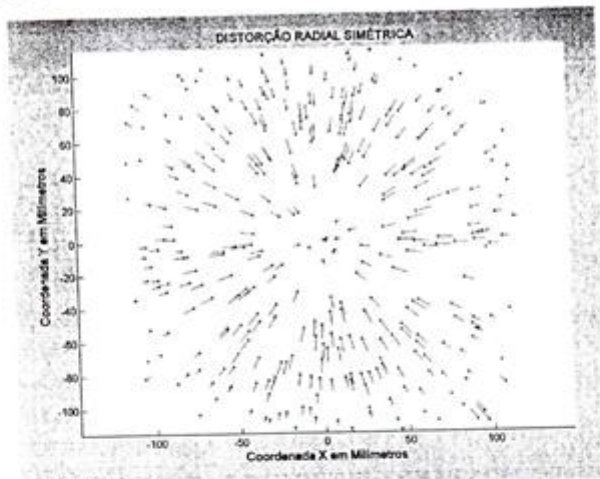
— : Curva para Distância Focal Gaussiana Equivalente  
 - - - : Curva para Distância Focal Compensada

**UBERABA**  
 Eng. Edson A. Mitschita - OREA 32.187  
 Responsável pela Calibração  
 Data da Calibração : 29 de Agosto de 2002

Provenção por similitude (s) firmada por:  
 Edson Mitschita  
 Edson Mitschita  
 Le. 13.228 de 1998  
 FUNARPEX  
 SELO DE AUTENTICAÇÃO  
 NOTARIA  
 MARISTELA LADA DE OLIVEIRA  
 Nº ADU93509  
 Cida. Uberaba de 04 de Agosto de 2002  
 Em Test. 04 de Agosto de 2002  
 AYDEE SANTOS LOPES - Escrevente  
 CRISTIANE MANIKA - Escrevente  
 MARISTELA LADA - Escrevente  
 MARILENE MARCHAKI FREITAG - Escrevente

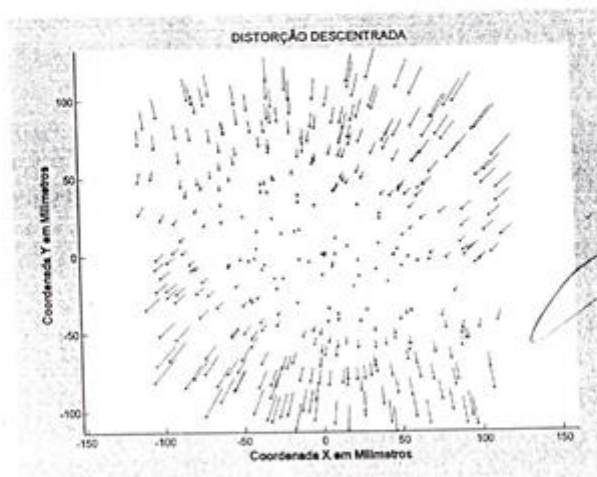


### 10.0 GRÁFICO VETORIAL DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA



Escala do vetor: 1000 vezes maior

### 11.0 GRÁFICO VETORIAL DE DISTORÇÃO DESCENTRADA



Escala do vetor: 1000 vezes maior

TABELÃO Nº 000 321  
100 Tabelão de Rotas da Capital-20  
Av. Jabaquara, 221 - Tel: 3563-305  
Autêntico e presente com o original  
original apresentado. Data de:

S.P. 07 ABR 2003 R\$ 1,10

0  
 0

Carregado, Notário  
de Uberaba  
Tributos Autorizados  
com selo de 100% de  
AUTENTICAÇÃO

1033AA1679

**UBERABA**  
*Edson A. Mitishita*  
Eng. Edson A. Mitishita - CREA 32.187  
Responsável pela Calibração  
Data da Calibração : 29 de Agosto de 2002

NOTARIA  
MARISETA LADA DE OLIVEIRA  
OAB 100935

Em testemunha por (embaixada de) *Edson A. Mitishita*  
*Edson A. Mitishita*  
29 agosto 2002


Ctba. Uberaba do  
Em test. *Edson A. Mitishita*

AYDEE SANTOS LOPES - Escrevente  
 CRISTIANE MANIQA - Escrevente  
 MARISETA LADA - Escrevente  
 MARILENE ARCHAKI BREITAG - Escrevente

## **ANEXO B - Fotografias Aéreas Utilizadas**

## ANEXO C - Relatórios do IBGE

### ANEXO C.1 - Relatório das Referências de Nível (RRNN)

		<b>Relatório de Estação Geodésica</b>	
<b>Estação :</b>	1003T	<b>Nome da Estação :</b>	1003T
<b>Município :</b>	PETRÓPOLIS	<b>Tipo :</b>	Estação Altimétrica RN
<b>Última Visita:</b>	19/7/2011	<b>Situação Marco Principal :</b>	Bom
		<b>UF :</b>	RJ

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22 ° 21 ' 56 " S	Altitude Ortométrica(m)	689,3638	Gravidade(mGal)	
Longitude	43 ° 07 ' 25 " W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	GPS Navegação	Sigma Altitude (m)	0.07	Precisão	
Origem	Transformada	Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	21/6/1971	Data Medição	
A Data Medição	20/8/2009	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.525.498			Densidade	
UTM(E)	693.208				
MC	-45				
Latitude	22 ° 21 ' 58 " S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43 ° 07 ' 27 " W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	GPS Navegação			Precisão	
R Origem				Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	20/8/2009			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.525.445			Densidade	
0 UTM(E)	693.149				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>

- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento_sirgas2000.pdf)

- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 16/09/1996 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento_sad69.pdf)

- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 - SAD-69

Localização	Descrição
No último degrau, a esquerda de quem entra, na Igreja do Liceu Municipal São José, na cidade de Itaipava.	

Chapa padrão IBGE.



Estação :	1003U	Nome da Estação :	1003U	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETROPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	25/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 23' 15" S	Altitude Ortométrica(m)	683,0034	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 07' 51" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Carta não informada	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem		Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	24/6/1970	Data Medição	
A Data Medição	24/6/1970	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.523.077			Densidade	
UTM(E)	692.433				
MC	-45				
Latitude	22° 23' 17" S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 07' 53" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Carta não informada			Precisão	
R Origem	Transformada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	24/6/1970			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.523.025			Densidade	
0 UTM(E)	692.375				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1995 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

#### Localização

A 10m do lado direito do trecho de estrada Itaipava - Petrópolis, 80m além do entroncamento de acesso a Petrópolis, Teresópolis e Areal, atrás do posto de combustível Shell, em frente ao marco quilométrico 1; 1,80km além da RN 1003-T.

#### Descrição

Marco padrão IBGE.

Estação :	1003V	Nome da Estação :	1003V	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETROPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	25/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 23' 44" S	Altitude Ortométrica(m)	684,3275	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 07' 31" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Carta não informada	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem		Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	25/6/1970	Data Medição	
A Data Medição	25/6/1970	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.522.178			Densidade	
UTM(E)	692.994				
MC	-45				
Latitude	22° 23' 46" S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 07' 33" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Carta não informada			Precisão	
R Origem	Transformada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	25/6/1970			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.522.125			Densidade	
0 UTM(E)	692.936				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1995 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

#### Localização

A 20m do lado direito, em terreno de propriedade da Cia. Alpha S/A - (fábrica de talheres); no canto da cerca, 30m do lado direito da entrada; 1,82km além da RN 1003-U.

#### Descrição

Marco padrão IBGE.

Estação :	1003Z	Nome da Estação :	1003Z	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETRÓPOLIS				UF : RJ
Última Visita:	25/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 24' 45" S	Altitude Ortométrica(m)	728,6527	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 05' 50" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Carta 1:50000	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem		Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	29/6/1970	Data Medição	
A Data Medição	29/6/1970	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.520.265			Densidade	
UTM(E)	695.860				
MC	-45				
Latitude	22° 24' 47" S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 05' 52" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Carta 1:50000			Precisão	
R Origem	Transformada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	29/6/1970			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.520.213			Densidade	
0 UTM(E)	695.801				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 16/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

**Localização**

A 10m do lado direito da estrada, 1m da cerca de arame que faz divisa com a Fazenda Santo Antônio de propriedade do Sr. Paulo Machado; 300m além do marco quilométrico 5; 700m aquém do marco quilométrico 7; 3m aquém da entrada para a fazenda; 3,10km além da RN 1003-X.

**Descrição**

Marco padrão IBGE.

Estação :	1004A	Nome da Estação :	1004A	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETRÓPOLIS				UF : RJ
Última Visita:	25/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 24' 08" S	Altitude Ortométrica(m)	745,0700	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 05' 31" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Carta não informada	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem		Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	30/6/1970	Data Medição	
A Data Medição	30/6/1970	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.521.396			Densidade	
UTM(E)	696.418				
MC	-45				
Latitude	22° 24' 10" S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 05' 33" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Carta não informada			Precisão	
R Origem	Transformada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	30/6/1970			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.521.344			Densidade	
0 UTM(E)	696.359				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 16/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

**Localização**

A 5m do lado esquerdo da estrada; 100m da rede telegráfica que cruza a rodovia; 900m além do marco quilométrico 7; 100m aquém do marco quilométrico 8; 1,60km além da RN 1003-Z.

**Descrição**

Marco padrão IBGE.



## Relatório de Estação Geodésica

Estação :	1004B	Nome da Estação :	1004B	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETRÓPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	25/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS			DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 24' 32" S	Altitude Ortométrica(m)	841,0785	Gravidade(mGal)		
Longitude	43° 04' 58" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)		
Fonte	Carta não informada	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão		
Origem		Datum	Imbituba	Datum		
S Datum	SAD-69	Data Medição	1/7/1970	Data Medição		
A Data Medição	1/7/1970	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo		
D Data Cálculo				Correção Topográfica		
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer		
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre		
UTM(N)	7.520.646			Densidade		
UTM(E)	697.352					
MC	-45					
Latitude	22° 24' 34" S	Gravidade(mGal)				
S Longitude	43° 05' 00" W	Sigma Gravidade(mGal)				
I Fonte	Carta não informada	Precisão				
R Origem	Transformada	Datum				
G Datum	SIRGAS2000	Data Medição				
A Data Medição	1/7/1970	Data Cálculo				
S Data Cálculo		Correção Topográfica				
2 Sigma Latitude(m)		Anomalia Bouguer				
0 Sigma Longitude(m)		Anomalia Ar-Livre				
0 UTM(N)	7.520.594	Densidade				
0 UTM(E)	697.293					
MC	-45					

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

### Localização

No lado esquerdo da estrada; 500m aquém do marco quilométrico 10; 1,70km além da RN 1004-A.

### Descrição

Marco padrão IBGE.



## Relatório de Estação Geodésica

Estação :	1004D	Nome da Estação :	1004D	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETRÓPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	25/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS			DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 25' 28" S	Altitude Ortométrica(m)	1.004,4884	Gravidade(mGal)		
Longitude	43° 04' 11" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)		
Fonte	Carta não informada	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão		
Origem		Datum	Imbituba	Datum		
S Datum	SAD-69	Data Medição	16/7/1970	Data Medição		
A Data Medição	16/7/1970	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo		
D Data Cálculo				Correção Topográfica		
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer		
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre		
UTM(N)	7.518.906			Densidade		
UTM(E)	698.674					
MC	-45					
Latitude	22° 25' 30" S	Gravidade(mGal)				
S Longitude	43° 04' 13" W	Sigma Gravidade(mGal)				
I Fonte	Carta não informada	Precisão				
R Origem	Transformada	Datum				
G Datum	SIRGAS2000	Data Medição				
A Data Medição	16/7/1970	Data Cálculo				
S Data Cálculo		Correção Topográfica				
2 Sigma Latitude(m)		Anomalia Bouguer				
0 Sigma Longitude(m)		Anomalia Ar-Livre				
0 UTM(N)	7.518.854	Densidade				
0 UTM(E)	698.615					
MC	-45					

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996 - Relatório em [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sad69.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

### Localização

A 30m do lado esquerdo da estrada, em terreno de propriedade do Sr. Rubens Berardo; 1m da cerca de arame, 400m além do marco quilométrico 12; 600m aquém do marco quilométrico 13; 1,40km além da RN 1004-C.

### Descrição

Marco padrão IBGE.



## Relatório de Estação Geodésica

Estação :	1014D	Nome da Estação :	1014D	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETRÓPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	19/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 21' 35" S	Altitude Ortométrica(m)	684,0963	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 07' 21" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Carta não informada	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem		Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	9/6/1971	Data Medição	
A Data Medição	9/6/1971	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.526.142			Densidade	
UTM(E)	693.330				
MC	-45				
Latitude	22° 21' 37" S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 07' 23" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Carta não informada			Precisão	
R Origem	Transformada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	9/6/1971			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.526.090			Densidade	
0 UTM(E)	693.271				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 16/06/2011 - Relatório em <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sirgas2000.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 16/09/1995 - Relatório em [ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sad69.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

### Localização

A 80m do lado esquerdo da Rodovia BR-135, estrada União Indústria, em terreno do Sítio Santa Maria, de propriedade do Embaixador Carlos Martins Thompson Flores; 2m do caminho para o sítio, no gramado, 40m aquém da casa, 80m além do portão; 200m além do marco quilométrico 74; 800m aquém do marco quilométrico 73; 3km além da RN 1014-C.

### Descrição

Marco padrão IBGE.



## Relatório de Estação Geodésica

Estação :	1014F	Nome da Estação :	1014F	Tipo :	Estação Altimétrica RN
Município :	PETRÓPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	19/7/2011	Situação Marco Principal :	Não Encontrado		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 25' 13" S	Altitude Ortométrica(m)	690,8178	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 09' 21" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Carta 1:50000	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem		Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	25/6/1971	Data Medição	
A Data Medição	25/6/1971	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo				Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.519.479			Densidade	
UTM(E)	689.815				
MC	-45				
Latitude	22° 25' 15" S			Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 09' 23" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Carta 1:50000			Precisão	
R Origem	Transformada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	25/6/1971			Data Cálculo	
S Data Cálculo				Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)				Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)				Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.519.427			Densidade	
0 UTM(E)	689.756				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 16/06/2011 - Relatório em <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sirgas2000.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 16/09/1995 - Relatório em [ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re\\_sad69.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/re_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

### Localização

A 50m do lado esquerdo da Rodovia BR-135, estrada do Contorno, 100m além da ponte sobre o Rio da Cidade, a direita de uma estrada carroçável, junto a cerca de arame; 400m além do marco quilométrico 61; 600m aquém do marco quilométrico 60; 2,70km além da RN 1014-E.

### Descrição

Marco padrão IBGE.



## ANEXO C.2 - Relatório da Estação SAT-91870



### Relatório de Estação Geodésica

Estação :	91870	Nome da Estação :	91870	Tipo :	Estação Planimétrica GPS
Município :	PETROPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	19/7/2011	Situação Marco Principal :	Bom		
Conexões :	RN : 1014E				

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 24' 46,7935" S	Altitude Ortométrica(m)	685,8676	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 08' 22,9020" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	GPS Geodésico	Sigma Altitude (m)	0,07	Precisão	
Origem	Ajustada	Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	22/6/1971	Data Medição	
A Data Medição	15/4/2002	Data Cálculo	15/6/2011	Data Cálculo	
D Data Cálculo	15/6/2002			Correção Topográfica	
S Sigma Latitude(m)	0,008	Altitude Ortométrica(m)	686,25	Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)	0,013	Altitude Geométrica(m)	692,11	Anomalia Air-ivre	
UTM(N)	7.520.264,669	Sigma Altitude Geométrica(m)		Densidade	
UTM(E)	691.486,000	Fonte	GPS Geodésico		
MC	-45	Data Medição	15/4/2002		
		Data Cálculo	28/6/2010		
		Modelo Geoidal	MAPGEO2010		
Latitude	22° 24' 48,5699" S	Altitude Ortométrica(m)	686,15	Gravidade(mGal)	
S Longitude	43° 08' 24,4131" W	Altitude Geométrica(m)	681,70	Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
R Origem	Ajustada	Data Medição	15/4/2002	Datum	
G Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	28/6/2010	Data Medição	
A Data Medição	15/4/2002	Sigma Altitude Geométrica(m)	0,041	Data Cálculo	
S Data Cálculo	23/11/2004	Modelo Geoidal	MAPGEO2010	Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)	0,005			Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)	0,011			Anomalia Air-ivre	
0 UTM(N)	7.520.219,132			Densidade	
0 UTM(E)	691.441,414				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 15/06/2011 - Relatório em <ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2008 - Relatório em [ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/06/1999 - Relatório em [ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel\\_sad69.pdf](ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/rel_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:25000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

#### Localização

A leste do canteiro central do trevo Bonsucesso, aproximadamente 50 m a oeste do Posto da Guarda Municipal e aproximadamente 40 m a leste do monumento ao centenário da Estrada de Rodagem União Industrial (antiga Rodovia BR-040), na cidade de Petrópolis-RJ.

#### Descrição

Tronco piramidal de concreto. Possui uma chapa estampada: RN 1014-E.

#### Itinerário

Partir do trevo da Rodovia BR-040 que dá acesso as cidades de Cordeiros, Bonsucesso e Itaipava, na altura do km 62, próximo a um revendedor Ford; com 1,1 km, trevo para Bonsucesso, local da estação.

Foto(s)



## ANEXO C.3 - Relatório do Vértice de Triangulação (VT)



### Relatório de Estação Geodésica

Estação :	554	Nome da Estação :	MENSAGEM	Tipo :	Estação Planimétrica VT
Município :	PETROPOLIS			UF :	RJ
Última Visita:	15/1/1987	Situação Marco Principal :	Destruido		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 23' 22,5199" S	Altitude Ortométrica(m)	1.437,33	Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 10' 38,5577" W	Fonte	Nivelamento Trigonométrico	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	Triangulação	Sigma Altitude (m)		Precisão	
Origem	Ajustada	Datum	Imbituba	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Medição	15/12/1982	Data Medição	
A Data Medição	15/12/1982	Data Cálculo	15/12/1982	Data Cálculo	
D Data Cálculo	15/9/1996			Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)	0,116			Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)	0,093			Anomalia An-Livre	
UTM(N)	7.522.904,386			Densidade	
UTM(E)	687.637,771				
MC	-45				
Latitude	22° 23' 24,2987" S			Gravidade(mGal)	
Longitude	43° 10' 40,0736" W			Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	Triangulação			Precisão	
R Origem	Ajustada			Datum	
G Datum	SIRGAS2000			Data Medição	
A Data Medição	15/12/1982			Data Cálculo	
S Data Cálculo	6/3/2006			Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)	0,114			Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)	0,077			Anomalia An-Livre	
0 UTM(N)	7.522.858,619			Densidade	
0 UTM(E)	687.593,064				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 16/06/2011 - Relatório em <ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em [ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento\\_sirgas2000.pdf](ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento_sirgas2000.pdf)
- Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/06/1996 - Relatório em [ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento\\_sad69.pdf](ftp://geofis.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento_sad69.pdf)
- Dados Planimétricos para Ponte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

#### Localização

Na parte mais alta de uma serra conhecida por Morro da Mensagem, distante cerca de 15 km ao Norte, da Cidade de Petrópolis - RJ.

#### Descrição

Cilindro de concreto, com chapa de bronze, estampada: MENSAGEM-554. Os marcos de referência A e B têm formato cilíndrico.

#### Itinerário

Partir do Posto da Polícia Rodoviária no trevo de Bonsucesso; seguir a Rodovia BR-135, em direção ao Rio de Janeiro; com 3,6 km, deixar a rodovia e entrar a direita, em direção a Araras; com 6,0 km, entrar a direita, em direção ao Sítio São Lucas; com 7,7 km, entrar a direita, em direção ao Sítio Bananal; com 8,8 km, próximo ao cruzamento com uma rede de alta tensão, deixar o veículo; seguir a pé acompanhando a rede de alta tensão, até chegar a uma porteira; entrar a direita; com 2 horas de caminhada, local do marco.

Foto(s)



## APÊNDICE A - Tabelas Contendo os Pontos de Campo e RRNN

APÊNDICE A.1 - Tabela contendo as diferenças altimétricas entre os pontos de campo, as RRNN e os modelos digitais de superfície com resolução de 10 metros

Ponto	Alt. Campo (h)	IBGE(10m)		E-Foto (10m)		LPS (10m)	
		Diferenças (m)	h (m)	Diferenças (m)	h (m)	Diferenças (m)	h (m)
RN1003T	689,363	-14,98	704,35	-20,66	710,02	-13,50	702,87
RN1003U	683,003	-34,50	717,50	-30,43	713,44	-25,86	708,86
RN1003V	684,327	-5,67	690,00	-12,40	696,73	1,67	682,65
RN1003Z	728,652	-1,35	730,00	-11,38	740,03	2,82	725,83
RN1004A	745,07	15,07	730,00	1,69	743,38	8,69	736,38
RN1004B	841,078	12,38	828,70	3,14	837,93	19,17	821,91
RN1004D	1004,488	20,33	984,16	6,98	997,51	30,84	973,65
RN1014D	684,096	-5,66	689,76	-28,20	712,30	-4,28	688,37
RN1014F	690,817	9,97	680,85	-7,99	698,81	11,78	679,04
poço_26	839,411	-1,64	841,05	-28,06	867,47	1,88	837,53
poço_27	813,719	-3,11	816,83	-30,37	844,09	-0,01	813,72
poço_28	886,737	1,48	885,26	-31,77	918,51	2,81	883,92
poço_29	883,209	-3,85	887,06	-29,55	912,76	1,16	882,05
poço_30	871,968	-2,96	874,92	-32,93	904,90	-8,12	880,09
poço_31	839,476	-6,82	846,30	-32,23	871,71	0,67	838,81
poço_32	838,931	-1,46	840,39	-30,50	869,43	1,78	837,15
1214	773,430	-6,57	780,00	-28,88	802,31	-0,75	774,18
1223	704,130	-5,87	710,00	-4,58	708,71	5,12	699,01
1233	691,170	1,17	690,00	1,71	689,46	15,69	675,48
1234	1173,070	2,27	1170,80	-2,86	1175,93	13,45	1159,62
PC003-05 (Base)	787,332	-2,67	790,00	32,02	755,31	-0,69	788,02
PC001-05	520,178	0,18	520,00	-24,68	544,85	1,93	518,25
PC002-05	612,812	-3,21	616,02	-28,43	641,24	1,66	611,15
PC006-05	784,798	-5,20	790,00	-36,69	821,49	1,89	782,90
PC007-05	958,365	-3,62	961,99	-0,16	958,52	8,39	949,97
PC008-05	733,684	-1,31	734,99	-5,50	739,18	7,16	726,53
PC010-06	756,510	-3,00	759,51	-20,52	777,03	-4,55	761,06
PC012-06	714,521	-1,52	716,04	-16,28	730,80	-4,74	719,26
PC013-06	796,703	-0,41	797,11	-11,34	808,04	-2,44	799,14
PC014-06	913,481	-2,87	916,35	-35,19	948,67	-1,68	915,16
PC015-06	691,874	-1,96	693,83	-10,72	702,60	3,60	688,27
PCQ004	733,353	-16,88	750,23	28,79	704,57	-14,18	747,53
PCQ005	679,700	7,91	671,79	-31,30	711,00	2,11	677,59
PCQ006	686,057	1,67	684,39	-9,08	695,14	-1,25	687,31
PCQ007	681,181	-1,87	683,05	-6,72	687,90	1,58	679,60
PCQ008	682,869	0,06	682,81	-27,99	710,86	2,37	680,50
PCQ009	729,449	-0,83	730,28	-9,24	738,69	6,73	722,72
SAT-91870	686,150	1,69	684,46	-5,56	691,71	10,41	675,74
VT584	1437,330	7,33	1430,00	-13,79	1451,12	9,43	1427,90



APÊNDICE A.2 - Tabela contendo as diferenças altimétricas entre os pontos de campo, as RRNN e os modelos digitais de superfície com resolução de 90 metros

Ponto	Alt. Campo (h)	SRTM		E-Foto (90m)		LPS (90m)	
		Diferenças (m)	h (m)	Diferenças (m)	h (m)	Diferenças (m)	h (m)
RN1003T	689,363	-20,75	710,11	-15,55	704,91	-17,46	706,83
RN1003U	683,003	-21,58	704,58	-9,65	692,66	-24,67	707,68
RN1003V	684,327	-12,29	696,62	-11,07	695,40	1,50	682,82
RN1003Z	728,652	-26,51	755,16	-23,83	752,48	3,93	724,73
RN1004A	745,07	-22,46	767,53	-7,36	752,43	9,28	735,79
RN1004B	841,078	17,59	823,49	2,80	838,27	15,89	825,19
RN1004D	1004,488	32,25	972,24	15,92	988,57	26,87	977,62
RN1014D	684,096	-12,82	696,92	15,61	668,48	-8,31	692,40
RN1014F	690,817	-17,57	708,38	-1,92	692,73	12,82	678,00
poço_26	839,411	-8,62	848,03	-29,12	868,53	3,54	835,87
poço_27	813,719	-7,76	821,47	-33,52	847,24	-3,52	817,23
poço_28	886,737	-35,79	922,52	-96,48	983,22	5,77	880,96
poço_29	883,209	-11,16	894,37	-48,87	932,08	-1,06	884,27
poço_30	871,968	-17,47	889,44	-58,53	930,50	-10,75	882,72
poço_31	839,476	-13,82	853,30	-31,35	870,83	-0,85	840,33
poço_32	838,931	-4,43	843,36	-31,05	869,98	0,55	838,38
1214	773,430	-31,26	804,69	30,23	743,20	-13,93	787,36
1223	704,130	-16,72	720,85	-5,87	710,00	-0,57	704,70
1233	691,170	-6,65	697,82	2,19	688,98	10,30	680,87
1234	1173,070	1,14	1171,93	-23,71	1196,78	-18,22	1191,29
PC003-05 (Base)	787,332	-11,06	798,39	-35,07	822,40	-2,70	790,03
PC006-05	784,798	-8,78	793,58	-10,16	794,96	-6,93	791,73
PC007-05	958,365	-20,01	978,38	-8,75	967,11	4,65	953,72
PC008-05	733,684	-15,38	749,06	-9,44	743,12	2,85	730,83
PC012-06	714,521	-0,26	714,78	-17,53	732,05	-7,27	721,79
PC013-06	796,703	-2,73	799,43	-12,84	809,54	-4,83	801,53
PC014-06	913,481	44,71	868,77	-15,67	929,15	0,84	912,64
PC015-06	691,874	-13,58	705,45	-13,28	705,16	-28,48	720,36
PCQ004	733,353	-45,01	778,37	-34,38	767,73	-8,76	742,11
PCQ005	679,700	-15,50	695,20	-3,59	683,29	-0,25	679,95
PCQ006	686,057	-8,23	694,29	-6,56	692,62	-3,24	689,29
PCQ007	681,181	-11,55	692,73	-8,79	689,97	-1,24	682,42
PCQ008	682,869	-12,00	694,87	-8,26	691,13	3,33	679,54
PCQ009	729,449	-49,48	778,93	-11,41	740,86	-0,66	730,11
SAT-91870	686,150	-15,60	701,75	-6,60	692,75	7,42	678,73
VT584	1437,330	85,25	1352,08	15,97	1421,36	56,29	1381,04

## **APÊNDICE B - Relatório Gerado no Processo Fotogramétrico do LPS**

## **APÊNDICE C - Relatório Gerado no Processo Fotogramétrico do E-Foto**