

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

INTEGRAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS
OBTIDOS ATRAVÉS DE DIFERENTES
TÉCNICAS PARA GERAÇÃO DE UM NOVO
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.

ALINE GOMES DA SILVA DRUZINA

Orientador: Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza

Porto Alegre (RS), Dezembro de 2007

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós Graduação em
Sensoriamento Remoto como requisito
para obtenção do título de Mestre.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ALINE GOMES DA SILVA DRUZINA

**INTEGRAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE
DIFERENTES TÉCNICAS PARA GERAÇÃO DE UM NOVO MODELO DIGITAL
DE ELEVAÇÃO.**

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dra. Andrea Lopes Iescheck

Departamento de Geodésia – Instituto de Geociências - UFRGS

Prof. Dr. Francisco Humberto Simões Magro

Departamento de Geodésia – Instituto de Geociências - UFRGS

Prof^a. Dra. Sílvia Beatriz Alves Rolim

Departamento de Geodésia – Instituto de Geociências - UFRGS

Dezembro, 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos sem fim por toda a ajuda, estímulo, tempo, paciência, cumplicidade, carinho do meu amado Cristiano e ao amor infinito de minha querida filha Marília. A vocês dedico este trabalho.

Ao meu pai, João, pelo amor, carinho, amizade, atenção, tolerância, educação e exemplo de vida.

À minha mãe, Vera e aos meus irmãos, Luciana e João Vitor, pela torcida, força, amor e carinho.

Ao colega, amigo e orientador Sérgio, pela grande ajuda em diversos momentos, sem a qual não teria nem ingressado neste curso.

À família do Cristiano: Lúcia, Milton, Livia, Letícia, Eduardo, Pedro, Maria Helena, Antônio Augusto pelo apoio e incentivo.

A todos meus amigos e colegas de mestrado.

A todos os professores, pesquisadores e servidores do CEPSRM da UFRGS.

A todos meus colegas do LAGEO e do Departamento de Geociências da UFRGS em especial ao professor Barbosa.

À Secretaria de Planejamento do Município de Porto Alegre e à 1ª Divisão de Levantamento do Exército por disponibilizarem diversos dados utilizados neste trabalho.

À empresa Sulsoft pelo suporte dado na etapa de geração do MDE ASTER.

A CAPES por financiar a minha bolsa de estudos.

¹Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação.

Aline Gomes da Silva Druzina

Orientador: Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza

RESUMO

Com o surgimento de novos métodos de extração de dados altimétricos no mercado de geotecnologias a escolha da melhor técnica é um problema que preocupa a maioria dos usuários. Como nenhum dado está isento de erros faz-se necessário propor método que faça uso dessa diversidade de informações minimizando-se o erro. A Colocação por Mínimos Quadrados é uma técnica que permite a integração de dados diferentes em tipo e precisão. Assim, a presente dissertação teve como objetivo a determinação e avaliação de um novo Modelo Digital de Elevação, denominado MDE Híbrido, a partir de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas: fotogrametria (curvas de nível extraídas de carta 1:50.000), estereoscopia em imagens de um sensor orbital (ASTER) e interferometria de radar (SRTM). Foram selecionadas três áreas no município de Porto Alegre/RS, que apresentam diferentes tipos de relevo: plano, misto e acidentado. Nessas áreas foram obtidos os MDEs a partir de curvas de nível, imagens ASTER e do SRTM com resoluções de 30m, 15m e 90m respectivamente. Uma avaliação pontual foi realizada nos três dados onde pode-se observar que para cada área de estudo um diferente dado apresentou menor Erro Médio Quadrático. Estes três dados foram então integrados utilizando-se a Colocação por Mínimos Quadrados e resolução de 15m. Após avaliação, o MDE Híbrido na Área Plana apresentou acurácia altimétrica igual a 3,493m e na Área Mista o valor de 4,763m o que atende aos requisitos da Classe A do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico) na escala 1:25.000. Já na Área Acidentada o valor encontrado foi de 8,66m atendendo os requisitos da Classe A do PEC na escala 1:50.000. Os resultados práticos alcançados nesta pesquisa mostraram que os dados altimétricos com diferentes resoluções espaciais podem ser integrados, desde que se tenha conhecimento das suas precisões. A resolução espacial de um determinado dado não está relacionada com a precisão deste dado.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, (79p), dezembro de 2007.

¹Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação.

Aline Gomes da Silva Druzina

Orientador: Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza

ABSTRACT

With the appearance of new methods of altimetric data extraction, the choice for the best technique is a problem that concerns the majority of users. As no data is error free, it is necessary to propose a methodology that may use this diversity of information as well as minimize errors which arise from each data. The Least-Squares Collocation (CMQ) is a technique that allows the integration of different data according to type and precision. Thus, this paper aimed at determining and evaluating a new Digital Elevation Model called Hybrid MDE, which was obtained through the integration of data from different techniques: Photogrammetry (level curves extracted from maps, Stereoscopy (ASTER) and Interferometry (SRTM). To evaluate the efficiency of this methodology, we selected three areas in the city of Porto Alegre/RS, which showed different types of relief: plain, mixed and rough. In these areas, the MDEs were generated from level curves and ASTER images, which had a resolution of 30 m and 15m respectively; we also included the SRTM data, which show a resolution of 90 m. These three data were then integrated, using the CMQ, and determining a new model with a final resolution of 15 m, which was called Hybrid MDE. Lastly, we realized an evaluation, in which the Hybrid MDE in the Plain Area showed an altimetric accuracy equal to 3,493 m and in the Mixed Area 4, 763, which follows the Class A requisites of the Standard of Cartographic Exactness (PEC) in the scale of 1:25.000. In the Rough Area, the value found was 8, 66 m , following the Class A requisites for PEC in the scale of 1:50.000. The practical results reached in this research show that altimetric data with different spatial resolutions may be integrated, as long as we are aware of its precision.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, (79p), dezembro de 2007.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. OBJETIVOS | 12 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 12 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos..... | 12 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA | 12 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 13 |
| 2. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO | 14 |
| 2.1. FONTES E PROCESSOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS | 15 |
| 2.1.1. Determinação de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados pontuais e/ou curvas de nível..... | 17 |
| 2.1.2. Determinação de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados de sensoriamento remoto..... | 19 |
| 2.1.2.1. Obtenção de Modelo Digital de Elevação a partir de imagens ASTER | 19 |
| 2.1.2.2. Obtenção do Modelo Digital de Elevação gerado na missão SRTM..... | 23 |
| 2.2. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO | 24 |
| 2.2.1. Inverso da Distância Ponderada | 26 |
| 2.2.2. Colocação por Mínimos Quadrados | 27 |
| 2.3. CONTROLE DA QUALIDADE EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO | 34 |
| 3. ÁREA DE ESTUDO | 40 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 42 |
| 4.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS | 42 |
| 4.1.1. Imagem ASTER..... | 42 |
| 4.1.2. MDE SRTM | 44 |
| 4.1.3. Curvas de Nível Vetorizadas com equidistância de 20m | 45 |
| 4.1.4. Curvas de Nível Vetorizadas com equidistância de 1m | 45 |
| 4.1.5. Pontos de Controle | 46 |
| 4.2. MÉTODOS | 46 |
| 4.2.1. Primeira Etapa: Planejamento..... | 47 |
| 4.2.2. Segunda Etapa: Composição da Verdade Terrestre..... | 48 |
| 4.2.3. Terceira Etapa: Geração de MDEs a partir de diferentes dados e avaliação do erro existente..... | 50 |
| 4.2.3.1. MDE Cartas | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3.2. MDE ASTER | 53 |
| 4.2.3.3. MDE SRTM | 56 |
| 4.2.4. Quarta Etapa: Geração do MDE Híbrido..... | 56 |
| 4.2.5. Quinta Etapa: Avaliação da qualidade do MDE Híbrido | 57 |
| 5. RESULTADOS | 58 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 67 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 69 |
| APÊNDICES..... | 72 |
| APÊNDICE A – Exemplo de aplicação do Método de Colocação por Mínimos | |
| Quadrados | 73 |
| ANEXOS | 75 |
| ANEXO A – Listagem de Coordenadas dos Pontos de Controle..... | 75 |
| ANEXO B – Listagem de Coordenadas dos Pontos de Controle utilizados na geração do | |
| MDE ASTER. | 77 |
| ANEXO C – Interface do software GEOGRID na geração dos MDEs Híbridos das | |
| diferentes áreas: plana, mista e acidentada. | 78 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1: Resumo das características do sensor ASTER. | 20 |
| Quadro 2: Resumo da classificação de Cartas segundo ao PEC. | 37 |
| Quadro 3: Limites das áreas de estudo – <i>Datum</i> WGS84 | 41 |
| Quadro 4: Algumas características das imagens ASTER nível 1B..... | 43 |
| Quadro 5: Parâmetros de Transformação entre Carta Geral e WGS84..... | 49 |
| Quadro 6: Padrão de Exatidão Cartográfica para uma Carta na Escala 1:50.000. | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Avaliação dos resíduos obtidos por Pontos de Controle menos Curvas (1m)..... | 49 |
| Tabela 2: Avaliação dos resíduos obtidos pelos MDEs ASTER (gerados com diferentes janelas de correlação) e os dados da Verdade Terrestre – Área Plana, Mista e Acidentada. ... | 55 |
| Tabela 3: Avaliação dos diferentes dados, SRTM, CARTAS e ASTER. | 58 |
| Tabela 4: Avaliação dos resíduos obtidos por Verdade Terrestre menos MDE Híbrido. | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1 – Esquema mostrando a matriz de amostra banda 3N, janela móvel e janela de busca na banda 3B. | 21 |
| Fig. 2 - Esquema de aquisição do par estereoscópico ASTER e obtenção da elevação em um ponto através do efeito de paralaxe. | 22 |
| Fig. 3 - Esquema mostrando o Modelo Básico de Colocação por Mínimos Quadrados..... | 31 |
| Fig. 4: Mapa de Localização das Áreas de Estudo com os bairros abrangentes. | 40 |
| Fig. 5: Banda 3N – Imagem ASTER de 12/09/2003..... | 42 |
| Fig. 6: Banda 3B – Imagem ASTER 12/09/2003..... | 43 |
| Fig. 7: MDE SRTM – área de 1° por 1° - arquivo S31W052.hgt..... | 45 |
| Fig. 8: Fluxograma 1ª Etapa: Planejamento..... | 47 |
| Fig. 9: Fluxograma 2ª Etapa: Composição da Verdade Terrestre..... | 48 |
| Fig. 10: Fluxograma MDE CARTAS..... | 51 |
| Fig. 11: Fluxograma MDE ASTER..... | 53 |
| Fig. 13: MDE Cartas e Mapas de Erro para as três áreas de estudo..... | 59 |
| Fig. 14: MDE ASTER e Mapas de Erro para as três áreas de estudo. | 60 |
| Fig. 15: MDE SRTM e Mapas de Erro para as três áreas de estudo. | 61 |
| Fig. 17: Histograma da diferença entre a Verdade Terrestre e o MDE Híbrido – Área Plana. 63 | |
| Fig. 18: Vista perspectiva dos MDEs gerados para a Área Plana. | 64 |
| Fig. 19: Histograma da diferença entre a Verdade Terrestre e o MDE Híbrido – Área Mista. 65 | |
| Fig. 20: Vista perspectiva dos MDEs gerados para a Área Mista. | 65 |
| Fig. 21: Histograma da diferença entre a Verdade Terrestre e o MDE Híbrido – Área Acidentada. | 66 |
| Fig. 22: Vista perspectiva dos MDEs gerados para a Área Acidentada..... | 66 |
| Fig. 45 – Exemplo de aplicação do Método de Colocação por Mínimos Quadrados considerando covariâncias planas..... | 73 |

1. INTRODUÇÃO

Entre as muitas aplicações atuais de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) pode-se citar: monitoramento ambiental, hidrologia, engenharia civil, geologia, telecomunicação, em Sistema de Informação Geográfica (SIG), no planejamento urbano e de transportes. A criação de um Modelo Digital de Elevação (MDE) corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema da elaboração e implantação de projetos. A partir de modelos pode-se calcular diretamente volumes e áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e aspecto (exposição), gerar fatiamentos nos intervalos desejados e perspectivas tridimensionais. Muito mais do que uma forma de visualização tridimensional do relevo, um MDE é um banco de dados geográfico.

O avanço tecnológico estimulado pela meta de aquisição de dados altimétricos cada vez mais precisos e de cobertura global criou um cenário nunca antes visto entre os usuários destes dados: um grande número de opções para aquisição, processamento, armazenamento e aplicações. Situação ótima pelo lado do desenvolvimento até então alcançado, mas ruim quando analisada a questão da escolha de uma técnica a ser utilizada para a manipulação destes dados. Entre as técnicas de aquisição de dados altimétricos disponíveis pode-se citar: a Topografia, a Fotogrametria, o Sensoriamento Remoto e a Interferometria de Radar. A metodologia utilizada na geração de um Modelo Digital de Elevação, mesmo que acompanhada com rigorosa atenção pelo usuário, pode apresentar alguns problemas difíceis de serem quantificados, como por exemplo: a presença de nuvens e sombras em imagens de sensores orbitais passivos, a generalização de curvas de nível em regiões com relevo íngreme e o tamanho da amostra de pontos necessária para a geração de um modelo mais próximo da realidade. Nenhuma técnica existente até hoje está isenta de erros e a pretensão de se chegar ao verdadeiro valor de uma grandeza medida é contrariada quando consideramos a influência de condições ambientais adequadas, a falibilidade humana e a imperfeição no equipamento. No entanto aproximações do relevo verdadeiro podem ser

obtidas com o conhecimento deste erro agregado aos dados altimétricos. O presente trabalho tem em vista os problemas de aproximações do relevo verdadeiro e integração dos diferentes métodos utilizados para a determinação de Modelos Digitais de Elevação e com isto propõe metodologia que faz uso desta diversidade de informações.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho se propõe a gerar e avaliar um novo Modelo Digital de Elevação, a partir de dados altimétricos obtidos pelas seguintes técnicas: fotogrametria (curvas de nível extraídas de carta 1:50.000), estereoscopia em imagens de um sensor orbital (ASTER) e interferometria de radar com abertura sintética (SRTM).

1.1.2. Objetivos Específicos

Para as áreas selecionadas com relevo diversificado: plano, acidentado e misto os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Gerar Modelos Digitais de Elevação (MDEs) a partir de dados altimétricos extraídos de carta topográfica, escala 1:50.000, utilizando o modelo matemático de Colocação por Mínimos Quadrados e avaliar os MDEs gerados.
- b) Gerar MDEs a partir do par estereoscópico de imagens do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e avalia-los.
- c) Avaliar os MDEs gerados pela SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) nas diferentes áreas desse estudo.
- d) Integrar os MDEs obtidos por diferentes técnicas através do modelo matemático de Colocação por Mínimos Quadrados, gerando assim um Modelo Digital de Elevação Híbrido (MDEH).
- e) Avaliar quantitativamente o MDEH gerado através de análises pontuais.
- f) Verificar a viabilidade da utilização do Método de Colocação por Mínimos Quadrados na integração de diferentes dados altimétricos.

1.2. JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a diversidade de métodos utilizados para a determinação de Modelos Digitais de Elevação (MDE), faz-se necessário propor metodologia que faça uso dessa diversidade de informações. A colocação por mínimos quadrados é uma técnica que

permite a integração de dados diferentes em tipo e precisão. Neste contexto motiva-se o desenvolvimento desta dissertação e justifica-se pelo fato de que a determinação de um MDE Híbrido pode atender uma quantidade maior de usuários. Espera-se que os resultados obtidos com essas análises possam servir de referência para trabalhos futuros.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos: no Capítulo 1 encontram-se a Introdução, onde são descritos os conceitos adotados para MDEs e suas aplicações. Seguido pelos objetivos, justificativas para sua execução e estrutura, os quais estão destacados em seções individuais. No Capítulo 2 abordam-se os Modelos Digitais de Elevação, onde estão as informações atuais sobre as fontes e estruturas de dados, as técnicas de geração de MDEs utilizadas neste trabalho tais como com dados pontuais e curvas de nível e a partir de dados de sensoriamento remoto, imagens ASTER e SRTM. Uma seção de métodos de interpolação aborda brevemente os interpoladores utilizados neste trabalho: o Inverso da Distância Ponderada e a Colocação por Mínimos Quadrado. Por fim algumas considerações são feitas a respeito do controle da qualidade em MDEs. As áreas de estudo utilizadas nesta pesquisa foram delimitadas e descritas em capítulo único, Capítulo 3. A partir do Capítulo 4, denominado Materiais e Métodos, as informações sobre os dados disponíveis foram dadas em seções separadas e a metodologia utilizada neste trabalho relatada através das suas cinco etapas. Dando continuidade no Capítulo 5 resultados parciais e finais obtidos são mostrados e discutidos através de algumas análises estatísticas. O fechamento das análises dá-se no Capítulo 6 onde também são feitas algumas considerações sobre os resultados obtidos.

2. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Segundo LI et al (2005) os modelos de terreno sempre atraíram os militares, administradores, paisagistas, engenheiros civis, como também outros peritos em várias ciências de terra. Originalmente, modelos de terreno eram modelos físicos feitos de borracha, plástico, barro, areia, etc. Durante a Segunda Guerra Mundial, muitos modelos foram feitos pela Marinha Americana e reproduzidos em borracha. Na Guerra das Malvinas em 1982 as forças britânicas utilizaram extensivamente em campo modelos de areia e barro para planejar operações militares. A introdução de técnicas matemáticas, numéricas e digitais para modelagem do terreno se deve muito às atividades de fotogrametristas que trabalhavam no campo da engenharia civil. Nos anos cinquenta, a fotogrametria começou a ser usada amplamente para coletar dados para projetos de estradas.

MILLER e LAFLAMME (1958) introduziram o conceito do Modelo Digital de Terreno, conforme definição dada a seguir: O Modelo Digital de Terreno (MDT) é 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. Comparado com a representação analógica tradicional, um MDT tem as seguintes características específicas:

- a) Uma variedade de formas de representação: em forma digital, podem ser produzidas facilmente várias formas de representações, como mapas topográficos, seções verticais e longitudinais, animação 3D, etc.
- b) Nenhuma perda de precisão de dados com o passar do tempo: com o passar do tempo, podem ser deformados mapas de papel, mas o MDT pode manter sua precisão devido ao uso do meio digital.
- c) Maior viabilidade de automatização e processamento em tempo real: na forma digital, a integração e atualização de dados são mais flexíveis do que na forma analógica.

- d) Fácil representação em várias escalas: um MDT pode ser organizado em resoluções diferentes, correspondendo a representações em diferentes escalas.

De certo modo, um MDT (em inglês *DTM*, *Digital Terrain Model*) é definido como uma representação digital (numérica) do terreno. Desde que MILLER e LAFLAMME (1958) definiram o termo original, foram trazidas outras alternativas em uso. Estes incluem MDEs, Modelos Digitais de Elevação (em inglês *DEMs*, *Digital Elevation Models*), MDAs, Modelos Digitais de Alturas ou Altitudes (em inglês *DHMs*, *Digital Height Models*), como também MDETs, Modelos Digitais de Elevação de Terreno (em inglês *DTEMs*, *Digital Terrain Elevation Models*). Estes termos originaram de países diferentes: *DEM* era extensamente usado na América; *DHM* era da Alemanha; e *DTEM* foi introduzido e usado pela *USGS* e *DMA* (*Defense Mapping Agency*). Na prática, mesmo existindo pequenas diferenças entre os termos (*DTM*, *DEM*, *DHM* e *DTEM*) estes são assumidos como sinônimos. Os termos “altura” e “elevação” enfatizam a “medição de um *datum* para o topo de um objeto”. Elas não necessariamente referem-se a altitude da superfície do terreno, mas, na prática, este é o aspecto que se destaca na utilização desses termos. O significado de “terreno” é mais complexo. Pode conter o conceito de “altura” (ou “elevação”), mas também as tentativas de incluir outros elementos geográficos e características naturais. Portanto, o termo MDT tende a ter um significado mais amplo do que MDA ou MDE porque incorpora características específicas do terreno tais como linhas de rios, cumes, cristas, quebras, para o modelo. O termo MDE é usualmente utilizado para dados que apresentam somente a informação da altitude e estejam organizados em formato matricial. Assim, o presente trabalho adota o termo MDE (Modelo Digital de Elevação).

2.1. FONTES E PROCESSOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS

Segundo HUTCHINSON e GALLANT (1999) podem ser reconhecidas três classes principais de fontes de dados de elevação para as quais são aplicáveis as diferentes técnicas de geração de Modelos Digitais de Elevação: pontos cotados, curvas de nível e dados de elevação de sensoriamento remoto aéreo e orbital.

Pontos cotados específicos da superfície, incluindo pontos altos e baixos, passagem de nível e cumes compõem o esqueleto do terreno. Eles são uma fonte de dados ideal para a maioria das técnicas de interpolação, inclusive métodos de triangulação e métodos de Krigagem especialmente adaptados. Estes dados podem ser obtidos através de levantamentos topográficos e manualmente através de estéreomodelos fotogramétricos. Com

o advento do GPS (Global Positioning System), os levantamentos em campo de pontos com precisão foram extremamente facilitados. Atualmente, o método de aquisição de dados via GPS denominado cinemático ou semi-cinemático vem sendo muito utilizado, nele o terreno é percorrido com uma antena portátil, ligada a um coletor de feições e, ao fim, descarregam-se os dados para seu pós-processamento. Este método é aplicável apenas em pequenas extensões de terreno e para projetos com certa tolerância de erro nos dados, sendo mesmo assim, empregado em extensões maiores, na maioria dos casos pelo desconhecimento dos métodos fotogramétricos, muito mais práticos (BRITO e COELHO, 2002).

Um mapa de isolinhas é a representação de uma superfície por meio de curvas de isovalores. Estas curvas de isovalores são chamadas de curvas de nível quando representam altitudes. As curvas de nível ainda são a fonte de dados altimétricos mais comum tratando-se de grandes áreas. Muitos destes dados são digitalizados a partir de mapas topográficos existentes que são a única fonte de dados altimétricos para algumas partes do mundo. Curvas de nível também podem ser extraídas automaticamente de estereomodelos fotogramétricos, embora este método esteja sujeito a erros (HUTCHINSON e GALLANT, 1999). SANTOS (2001) considera a digitalização de documentos cartográficos como a técnica de extração de atributos menos precisa existente. Isto devido aos originais de impressão que trazem incorporados em si erros inerentes aos procedimentos operacionais de confecção da folha topográfica no formato analógico. A digitalização de cartas topográficas analógicas pode ser realizada utilizando-se mesas digitalizadoras (manual) ou através de *scanners*. A digitalização manual consiste na operação de identificação de atributos de uma carta topográfica através da mesa digitalizadora. Para a aquisição de dados altimétricos, por exemplo, o operador contornará cada curva de nível e associará o respectivo valor de altitude ao longo da carta topográfica, transformando assim estes dados para o formato digital. O resultado final é dependente da qualidade do *hardware* e do *software* empregados, da habilidade do operador e do número de horas despendidas na execução da tarefa. A digitalização com uso de *scanners* é um método onde um determinado documento é transformado em uma imagem digital através do contato com um detector ótico-eletrônico. Com isso, o resultado é uma série de linhas de varreduras contendo uma gama de tons de cinza para cada célula, detectada a partir da incidência de um feixe de luz sobre o documento. Existem dois principais tipos de *scanners*: os de mesa e os de tambor.

Os valores altimétricos dos MDEs podem ser calculadas diretamente por interpretação estereoscópica de dados coletados por sensores em nível aéreo e orbital. A fonte tradicional destes dados é a fotografia aérea que, quando na ausência de cobertura de

vegetação, pode fornecer altitudes com precisão sub-métrica. Métodos estereocópicos têm sido aplicados para imagens SPOT, CBERS, ASTER, IKONOS, QUICKBIRD e, mais recentemente, para o Radar de Abertura Sintética (*Spaceborne Synthetic Aperture Radar - SAR*). Tal desenvolvimento tecnológico é estimulado pela meta de geração de Modelos Digitais de Elevação de alta resolução e cobertura global. Produtos de sensoriamento remoto podem fornecer larga cobertura espacial, mas com algumas limitações. Nenhum dos sensores pode medir, de maneira confiável, a altimetria debaixo da cobertura vegetal. Mesmo com a ausência de cobertura vegetal no terreno todos os métodos medem altitudes com erros significativos associados às limitações inerentes aos instrumentos de observação, como também ao declive e a rugosidade da superfície. Os métodos também necessitam de pontos de controle em campo precisamente localizados, nem sempre fáceis de ser coletados, especialmente em regiões de relevo acidentado. Atualmente, os menores erros padrão de elevação obtidos com sistemas orbitais atualmente alcançam entre 1 e 10 metros, podendo alcançar até 100 metros sob condições desfavoráveis. Calculando a média dos dados obtidos por múltiplas passagens do sensor pode-se reduzir estes erros. Dados de SAR aerotransportado estão disponíveis para áreas de extensão limitada. Os erros padrão de elevações para MDEs derivados destes dados podem ser tão pequenos quanto de 1 a 3 metros (HUTCHINSON e GALLANT, 1999).

2.1.1. Determinação de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados pontuais e/ou curvas de nível

Procedimentos para a geração de Modelos Digitais de Elevação necessitam ser guiados tanto pela natureza da fonte de dados assim como pelas suas aplicações planejadas. Para a maioria das aplicações, a representação precisa da forma da superfície e das estruturas de drenagem são mais importantes que a precisão da elevação absoluta, particularmente em áreas com baixo relevo. Segundo FELGUEIRAS (2004) o processo de geração de Modelos Digitais de Elevação que possui como fonte de dados pontos e/ou curvas de nível podem ser resumidos em três etapas denominadas: aquisição das amostras ou amostragem, modelagem e aplicações.

Os dados de Modelos Digitais de Elevação estão representados pelas coordenadas x,y,z , onde z caracteriza o parâmetro a ser modelado, sendo $z = f(x,y)$. A etapa de amostragem nada mais é que a seleção e aquisição do conjunto de amostras que representem o fenômeno a ser modelado. Trata-se aqui de amostras com pontos cotados. As curvas de nível vetorizadas podem ser vistas não só como contornos de uma determinada altitude, mas

também como uma seqüência de pontos com coordenadas x,y de mesmo valor em z (pontos cotados). Essas amostras podem estar distribuídas de maneira regular, semi-regular e irregular ou dispersa de acordo com a sua aquisição (FELGUEIRAS, 2004).

A etapa de modelagem é a geração do modelo a partir do conjunto de amostras selecionado. Os tipos de Modelos Digitais de Elevação mais utilizados são: os modelos de rede regular retangular e os modelos de rede irregular triangular, comumente denominado TIN (*Triangular Irregular Network*) (FELGUEIRAS, 2004):

A rede retangular regular é um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas posições x e y que definem o *grid* (grade) desejado. Um modelo de rede regular retangular pode ser gerado a partir de um conjunto de amostras regularmente espaçadas ou a partir de um conjunto de amostras irregularmente espaçadas. O processo de geração de uma rede regular retangular a partir de outra rede também regular retangular, objetivando uma melhora na resolução do *grid*, é conhecido como refinamento do *grid*. Para se gerar redes regulares retangulares a partir de amostras irregularmente espaçadas é comum definir-se funções interpolantes simples (por exemplo: médias ponderadas, splines, etc...) e utilizá-las localmente (FELGUEIRAS, 2004).

Uma rede irregular triangular é um poliedro de faces triangulares. Em um modelo de rede irregular triangular os pontos amostrais são conectados por linhas para formar triângulos. Assim, diferentemente da geração da rede regular, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações (FELGUEIRAS, 2004).

Após a geração do MDE são executados diversos procedimentos de análises que são as aplicações do produto. As análises desenvolvidas sobre um MDE permitem: visualizar o modelo em projeção geométrica planar; gerar imagens em níveis de cinza, imagens sombreadas e imagens temáticas; calcular volumes de aterro e corte; realizar análises de perfis sobre trajetórias pré-determinadas e; gerar produtos derivados tais como mapas de declividade e exposição, mapas de drenagem, mapas de curva de nível e mapas de visibilidade. Os produtos das análises podem, ainda, ser integrados com outros tipos de dados geográficos, objetivando o desenvolvimento de diversas aplicações tais como, planejamento urbano e rural, análises de aptidão agrícola, determinação de áreas de riscos, geração de relatórios de impacto ambiental e outros (FELGUEIRAS, 2004).

2.1.2. Determinação de Modelos Digitais de Elevação a partir de dados de sensoriamento remoto

A geração de MDEs a partir de dados de sensoriamento remoto apresenta muitos aspectos positivos quando comparada a tradicional geração a partir de dados pontuais porque utiliza métodos mais rápidos, automatizados, com custo mais baixo.

As técnicas de extração da altimetria baseada em dados de sensoriamento remoto são duas: a estereoscopia e a interferometria. Na estereoscopia a altitude é obtida de medidas de discrepâncias no posicionamento de um ponto no terreno em um par de imagens tomadas sob ângulos de observação distintos. Portanto, a determinação da altitude depende da identificação do quanto um ponto foi deslocado em uma imagem em relação à outra imagem (paralaxe), e utiliza estimativas de correlação para medir o deslocamento. Pode ser aplicada em dados derivados de sensores passivos (sensores que medem a radiação refletida e/ou emitida pelos alvos, que provém de uma fonte externa, como exemplo o Sol) e ativos (sensor que possui sua própria fonte de radiação). Na interferometria, técnica aplicada em dados de sensores ativos, a elevação é obtida através do cálculo da diferença de fase do sinal retroespalhado, em tomadas sob geometrias distintas (PARADELLA et al, 2005).

Atualmente muitos sensores, que apresentam condições para a aplicação das técnicas de extração da altimetria, estão em funcionamento, tais como: ASTER, SPOT, CBERS, IKONOS, QUICKBIRD, RADARSAT, ERS2, ENVISAT. A escolha dos dados para a realização do presente trabalho baseou-se em três critérios: a disponibilidade das imagens, a exploração das diferentes técnicas (estereoscopia e interferometria) e o custo. Sendo assim foram utilizados imagens do sensor passivo ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*) e o MDE gerado através dos dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com base em imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

2.1.2.1. Obtenção de Modelo Digital de Elevação a partir de imagens ASTER

A bordo do satélite TERRA, lançado em dezembro de 1999 como parte do Earth Observing System (EOS) da NASA (National Aeronautics and Space Administration), o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*) é constituído por três sub-sistemas de imageamento independentes, os quais coletam dados em várias regiões do espectro eletromagnético: visível e infravermelho próximo (VNIR) com 3 bandas (resolução espacial de 15m), infravermelho médio (SWIR) com 6 bandas (resolução espacial de 30m) e infravermelho termal (TIR) com 5 bandas (resolução espacial de 90m). Uma banda adicional (chamada 3B – “*Backwards*”) opera com mesma resolução da banda 3

(chamada 3N – “Nadir”) do sensor visível e infravermelho próximo, esta banda é obtida com retro-visada (ângulo de 27,6°) ao longo da órbita do satélite (com poucos segundos de diferença da visada em Nadir) permitindo a geração de pares estereocópicos (Quadro 1).

Quadro 1: Resumo das características do sensor ASTER.

| Sub-sistemas | Bandas | Intervalo Espectral (μm) | | Resolução Espacial (m) | Níveis de Quantização |
|--------------|--------|---------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------|
| VNIR | 1 | 0,52 | 0,6 | 15 | 8 bits |
| | 2 | 0,63 | 0,69 | | |
| | 3N | 0,78 | 0,86 | | |
| | 3B | 0,78 | 0,86 | | |
| SWIR | 4 | 1,6 | 1,7 | 30 | 8 bits |
| | 5 | 2,145 | 2,185 | | |
| | 6 | 2,185 | 2,225 | | |
| | 7 | 2,235 | 2,285 | | |
| | 8 | 2,295 | 2,365 | | |
| | 9 | 2,36 | 2,43 | | |
| TIR | 10 | 8,125 | 8,475 | 90 | 12 bits |
| | 11 | 8,475 | 8,825 | | |
| | 12 | 8,925 | 9,275 | | |
| | 13 | 10,25 | 10,95 | | |
| | 14 | 10,95 | 11,65 | | |

Fonte: Adaptado de ABRAMS e HOOK, 2002.

Cada cena ASTER cobre uma área de 60km x 60km no terreno e a resolução temporal é de 16 dias ou inferior pois não opera 100% do tempo adquirindo dados em função do tempo de imageamento compartilhado com outros 4 sensores a bordo do satélite. Com uma altitude de 705km em relação à superfície média da Terra o sensor registra cenas entre a latitude 82°N e 82°S com velocidade de 6,7km/s (TSU, 1996; FILHO, 2003)

O princípio básico utilizado para a extração do Modelo Digital de Elevação é o efeito da paralaxe, ou seja, a partir de imagens de um mesmo objeto em duas dimensões tomadas em dois ângulos diferentes pode-se obter um modelo tridimensional do objeto (STEINMAYER, 2003).

Para se calcular a elevação de um ponto através do efeito da paralaxe se faz necessário que este ponto, presente na banda 3N, seja localizado corretamente na banda 3B, ou seja, deve existir uma correlação entre as duas imagens. Para que isso ocorra, a primeira etapa é corrigir as imagens geometricamente podendo-se utilizar para isso tanto pontos de controle externos quanto dados das efemérides do satélite contidos nos arquivos de metadados no formato HDF (*Hierarchical Data Format*) da imagem.

Como segunda etapa, passa-se à identificação dos pontos homólogos. Uma matriz de amostra deve ser obtida em uma das imagens que será deslocada ao longo da outra imagem (janela móvel) para localizar o ponto mais semelhante com ela. Essa matriz de amostra é

definida na imagem de referência (banda 3N). O programa (ou rotina) utilizado deve gravar em uma matriz os valores dos números digitais (0 a 255) do *pixel* central e de vários outros adjacentes a ele. Esses valores são arranjados em uma coluna, e equivalerão à variável X. As matrizes deverão ter tamanhos ímpares, para que o ponto de interesse esteja no seu centro. Em geral, usam-se matrizes 9x9 ou 11x11 para isto. O próximo passo é escolher uma janela de busca na imagem conjugada (banda 3B) em uma região maior. A partir daí, dentro da janela de busca, uma janela móvel equivalente em tamanho ao da matriz de amostra corre *pixel a pixel*, da esquerda para a direita e de cima para baixo. Os valores armazenados neste segundo recorte serão equivalentes à variável Y (Fig. 1). Uma vez obtida a matriz das duas variáveis X e Y calcula-se o coeficiente de correlação entre elas através da seguinte fórmula:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (1)$$

Onde: r_{xy} = coeficiente de Person que é o indicador do grau de associação linear entre as duas variáveis X e Y; cov_{xy} = covariância entre as duas variáveis X e Y sendo calculada por:

$$\text{cov}_{xy} = \frac{\sum (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{(n - 1)} \quad (2)$$

e S_x e S_y = Desvio-padrão das variáveis X e Y respectivamente.

A combinação que possuir o maior valor para o coeficiente de correlação será equivalente aos pontos homólogos. As coordenadas para este ponto serão as coordenadas do *pixel* central de ambas as matrizes X e Y (BRITO e COELHO, 2002; CENTENO e FILHO, 2004).

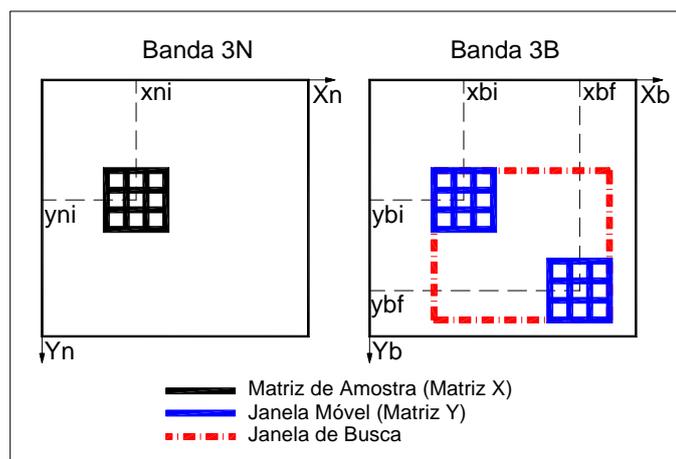


Fig. 1 – Esquema mostrando a matriz de amostra banda 3N, janela móvel e janela de busca na banda 3B.

Fonte: Adaptado de Brito e Coelho, 2002.

A partir do momento que as duas imagens (bandas 3N e 3B) foram correlacionadas podemos calcular o deslocamento entre elas. Então para cada *pixel* de

coordenadas x_n e y_n da imagem 3N relaciona-se as coordenadas x_b e y_b da imagem 3B através de:

$$\text{Deslocamento} = \Delta = \sqrt{(x_b - x_n)^2 + (y_b - y_n)^2} \quad (3)$$

Para o ASTER esse deslocamento devido à paralaxe acontece exclusivamente na direção da órbita. Dessa forma, y_b menos y_n é zero restando somente Δx .

Com a determinação da paralaxe, a altura de qualquer ponto dentro das cenas imageadas pode ser aproximada por:

$$hp = \Delta x \cdot \frac{H}{B} \quad (4)$$

Onde: hp = altura do ponto; Δx = paralaxe em x; H = altitude da órbita do satélite em relação a superfície de referência $\cong 705\text{Km}$; B = base

O quociente B/H é aproximadamente 0,6 e é esta relação que determina a resolução altimétrica no ASTER. Um deslocamento de Δx de um pixel (15m banda 3N) corresponde a uma diferença de elevação de 25m (STEINMAYER, 2003). Um esquema pode ser visualizado na figura 2 da aquisição do par estereoscópico ASTER e a obtenção da elevação em um ponto através do efeito da paralaxe:

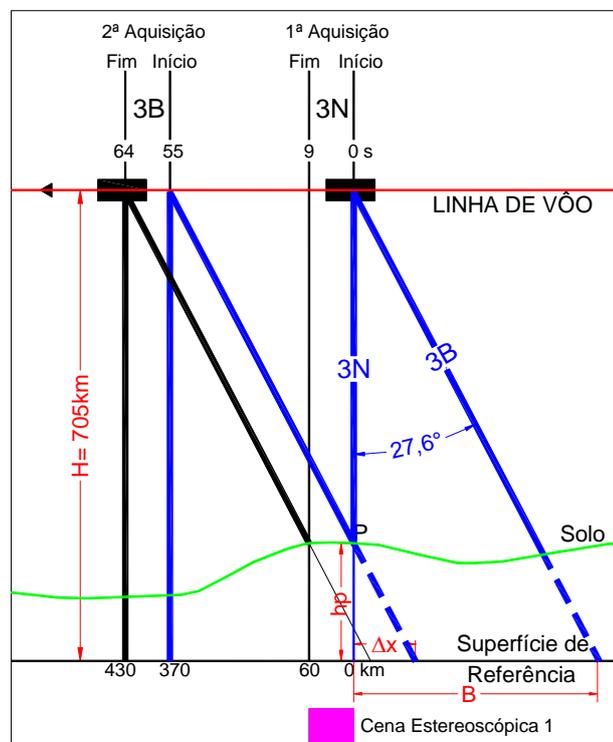


Fig. 2 - Esquema de aquisição do par estereoscópico ASTER e obtenção da elevação em um ponto através do efeito de paralaxe.

Fonte: Adaptado de Steinmayer, 2003

2.1.2.2. Obtenção do Modelo Digital de Elevação gerado na missão SRTM

Para várias partes do mundo, os mapas topográficos da Terra são limitados, inexatos, ou inexistentes. Por exemplo, em áreas montanhosas, desérticas e regiões com florestas tropicais densas, não há total cobertura topográfica devido à dificuldade de acesso a estes locais. Outro fator limitante para estudos em extensões regionais ou globais onde a topografia precisa é importante, é a falta de padronização, visto que países vizinhos podem gerar dados topográficos por métodos completamente diferentes. Frente a este problema a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) em parceria com as agências espaciais da Alemanha DLR (*German Aerospace Center*) e Itália ASI (*Italian Space Agency*), realizaram a SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), com o objetivo de obter dados de elevação por radar em uma escala quase global afim de gerar um modelo topográfico digital de alta resolução da Terra.

A SRTM foi realizada durante 11 dias do mês de fevereiro de 2000, cobrindo certa de 80% da superfície terrestre (compreendida entre as latitudes 60°N e 56°S), com resolução espacial de aproximadamente 1 arco de segundo (30m). O equipamento principal da SRTM foi o radar imageador SIR-C/X-SAR que orbitou duas vezes em ônibus espaciais no ano de 1994.

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, bruma e fumaça impõem restrições ao uso de sensores ópticos. Além disso, um radar imageador é o único sensor remoto com penetrabilidade no dossel vegetal, oferecendo ainda, a polarimetria e interferometria (PARADELLA et al 2005).

Foram realizadas várias modificações no radar SIR-C/X-SAR que forneceram à SRTM novas capacidades de sistema. A principal mudança foi a adição das antenas da banda-C e banda-X na extremidade de um mastro de 60m. A banda X opera dentro do intervalo de comprimento de onda de 2,7cm a 5,21cm e a banda C de 5,21cm a 7,69cm. Estas antenas secundárias, ou "externas", permitiram ao radar usar uma técnica chamada interferometria para coletar a elevação do terreno em uma única passagem, o que não era possível com o SIR-C/X-SAR de 1994. A técnica de interferometria consiste na comparação (medição da diferença de fase) de duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para se obter a elevação ou informações de mudanças na superfície (MURA, 2000; NASA, 2005).

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 30m para a região da América do Norte e em uma resolução de 90m para a América do Sul e demais locais da Terra. Esses dados estão disponibilizados gratuitamente para *download* via FTP (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/>), na sua forma bruta - versão 1, ou em uma nova versão com um nível de processamento ainda maior. Além da gratuidade, outro ponto a favor dos dados da SRTM é a possibilidade de automatização quase completa no processo de geração do MDE, característica da técnica de extração da altimetria InSAR (Interferometria por Radar de Abertura Sintética), (NASA, 2005; TOUTIN, 2000; USGS, 2005).

NIEVINSKI (2004) apresentou a técnica de interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) para determinação da posição e deslocamento de alvos. Esta técnica tem despertado interesse devido à sua capacidade de gerar mapas de elevação através de um processo quase automático e mapas de deformação com sensibilidade até milimétrica, ambos com resolução de metros. Através de uma completa revisão da literatura internacional sobre o assunto, elaborou um modelo do processamento InSAR na forma de fluxograma e o processamento interferométrico de um par de imagens SAR ERS1/2 e de três imagens ENVISAT. Concluiu que a técnica de In-SAR ainda precisa ser mais desenvolvida em instituições de pesquisa, antes que seu uso se torne comum na produção regular por empresas de mapeamento.

2.2. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Segundo BURROUGH (1998) 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 estas medidas podem ser comparados com os padrões espaciais de outras entidades espaciais. Desta forma a interpolação é necessária quando:

- a) uma superfície discretizada tem um nível diferente de resolução, tamanho de pixel ou orientação, ou
- b) uma superfície contínua é representada por um modelo de dados que é diferente do exigido, ou
- c) os dados não cobrem completamente o domínio de interesse.

Um método de interpolação que prediz um valor de um atributo a um ponto amostral idêntico ao valor medido denomina-se interpolador exato. Esta é a situação ideal, porque só ocorre com dados pontuais onde se têm conhecimento direto do atributo em questão. Todos os outros métodos são interpoladores inexatos. As estatísticas das diferenças (absolutas e quadráticas) entre valores de medidas e predições de dados pontuais $z'(x_i) - z(x_i)$ (onde $z'(x_i)$ = valor do atributo interpolado e $z(x_i)$ = valor do atributo medido) são freqüentemente usadas como um indicador da qualidade de um método de interpolação inexato (BURROUGH, 1998).

Métodos de interpolação podem ser divididos em dois grupos, chamados interpoladores globais e locais. Interpoladores globais usam todos os dados disponíveis para fornecer predições para a área inteira de interesse, enquanto interpoladores locais operam dentro de uma pequena zona ao redor do ponto a ser interpolado para assegurar que estimativas sejam feitas somente com dados situados na vizinhança imediata ao ponto (BURROUGH, 1998).

Dentro dos interpoladores de efeito locais e globais existem os métodos Geoestatísticos que usam autocorrelação espacial (ex: Krigagem, Colocação por Mínimos Quadrados) necessitam da compreensão dos princípios de autocorrelação do espaço estatístico. Estes métodos são usados quando a variação de um atributo é muito irregular, e a densidade de amostras é tal, que métodos simples de interpolação acabam por fornecer predições incertas. Métodos Geoestatísticos fornecem estimativas probabilísticas da qualidade da interpolação. Além disso, permitem a interpolação de funções indicadoras e podem incorporar dados temporários para guiar a interpolação, aumentando assim a precisão dos resultados (BURROUGH, 1998; FELGUEIRAS, 2004).

Interpoladores Globais não são muito usados para interpolação direta, mas para a análise e possibilidade de remoção de efeitos de variações globais ou a presença de várias classes de terra o que pode indicar áreas que têm valores de média diferentes. Como exemplos de interpoladores globais estão os métodos de classificação supervisionada, superfícies de tendência em coordenadas geométricas, métodos de análises espectrais e modelos de regressão (BURROUGH, 1998; FELGUEIRAS, 2004).

Para se obter uma interpolação onde o valor do ponto interpolado seja semelhante aos valores medidos próximos a ele, surge os métodos locais de interpolação que usam diretamente as informações dos dados pontuais mais próximos. Para esta aproximação, a interpolação envolve: A definição de uma área de procura ou vizinhança ao redor do ponto a ser predito, o encontro de dados pontuais dentro deste bairro, a escolha de uma função

matemática para representar a variação em torno deste número limitado de pontos e a avaliação do ponto. Este procedimento deverá ser repetido até que todos os pontos no *grid* sejam computados. Precisa-se também analisar o tipo de função de interpolação a ser utilizada; o tamanho, forma, e orientação do bairro (vizinhança); o número de dados pontuais; a distribuição dos dados pontuais: regular ou irregular; a possível incorporação de informação externa em tendências ou de domínios diferentes. Pode-se citar dentro das diferentes funções de interpolação Locais: o Vizinho mais Próximo, Inversa da Distância Ponderada, Splines e outras funções não lineares, funções que usam covariância espacial (BURROUGH, 1998; FELGUEIRAS, 2004).

2.2.1. Inverso da Distância Ponderada

Segundo FELGUEIRAS (2004) a formulação geral para o ajuste de uma função bidimensional sobre determinadas amostras, compondo uma superfície cujo valor será proporcional a intensidade de amostras local é:

$$\hat{Z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

Onde: Z_i é o valor da altitude de um ponto i qualquer do *grid*, Z_j é a altitude de uma amostra j vizinha do ponto i da grade e W_{ij} é um fator de ponderação.

O interpolador Inverso da Distância considera como fator de ponderação o Inverso da Distância Euclidiana do ponto do *grid* à amostra considerada:

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^k} \quad (6)$$

onde: k é o expoente da distância, geralmente igual a 1 ou 2 e; d_{ij} é o valor de distância da amostra j ao ponto i do *grid*, expresso por:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7)$$

O método do Inverso da Distância baseia-se na continuidade espacial porque aplica maior peso às amostras mais próximas e menor peso àquelas mais afastadas. Este método ainda possibilita que a ponderação da distância seja elevada a uma potência k . A potência mais comumente usada é a de 2ª ordem, por esta razão o método também é conhecido como inverso do quadrado da distância.

2.2.2. Colocação por Mínimos Quadrados

Segundo GEMAEL(1994):

A aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) no ajustamento de observações vem ocorrendo em crescente escala desde o tempo de GAUSS e LEGENDRE. No início dos anos 60 surgiram os trabalhos de KAULA (1959) e MORITZ (1970) vinculando o MMQ a problemas de interpolação de anomalias gravimétricas e, na década seguinte, HEITZ, GRAFAREND e outros estenderam essa aplicação às técnicas de predição de desvios da vertical. E foi nessa área da Geodésia Física, na manipulação das grandezas que constituem o “campo anômalo da gravidade” (componentes do desvio, anomalias, ondulações do geóide), que a teoria hoje denominada COLOCAÇÃO encontrou condições próprias ao seu desenvolvimento. Se os autores citados anteriormente lançaram as primeiras sementes, quem realmente instituiu a COLOCAÇÃO como uma generalização do MMQ foi KRARUP (1969); este geodesta dinamarquês estabeleceu as bases de uma teoria que pode reunir, num mesmo contexto matemático, sob a égide do MMQ, a interpolação, a filtragem e o ajustamento. KRARUP (1969) desenvolveu o seu trabalho no espaço de Hilbert; MORITZ (1972) divulgou-o em linguagem algébrica, mais acessível à grande maioria dos geodestas.

Neste trabalho, o modelo matemático adotado para a integração dos dados altimétricos é o método de Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ). Uma adaptação dos parâmetros e formulações adotadas por ele foi realizada, por tratar-se de grandezas para a modelagem do campo anômalo da gravidade e não para a modelagem altimétrica da Terra.

O princípio do Método dos Mínimos Quadrados é exposto da seguinte forma por GEMAEL (1994): Para uma determinada grandeza X onde l_1, l_2, \dots, l_n são valores obtidos em uma série de n observações. Na impossibilidade obter-se o verdadeiro valor de X contenta-se com uma estimativa de maior confiança. Adotando, como base um certo critério, o valor x e calculando as diferenças por:

$$\begin{aligned} x - l_1 &= v_1 \\ x - l_2 &= v_2 \\ &\dots \\ x - l_n &= v_n \end{aligned} \rightarrow x - l_i = v_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Tais diferenças (v_i) são os resíduos, isto é, os valores, a priori desconhecidos, que somados às observações reproduzem o valor escolhido x . Mudando o critério pode-se eleger um valor diferente x' o que resulta em um novo conjunto de resíduos v'_i e assim por diante. O problema está em decidir qual dos valores x, x', x'', \dots adotar. Deve-se realizar a escolha de um critério que permita a partir das observações repetidas l_i possa-se extrair um único valor

para a incógnita X. GAUSS e LEGENDRE, há quase dois séculos, fizeram a opção de aceitar como melhor estimativa de X o valor que torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos (GEMAEL, 1994):

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min \quad (9)$$

Quando as observações não oferecem o mesmo grau de confiança são “homogeneizadas” através de pesos p_i :

$$\sum_{i=1}^n p_i v_i^2 = \min \quad (10)$$

Esse critério, instituído por estes dois grandes matemáticos acima citados, caracteriza o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). A teoria clássica considerava certas restrições, hoje dispensáveis, como não-correlação das observações e a necessidade dos resíduos obedecerem a distribuição normal; e até há bem pouco conservava a notação original de GAUSS (GEMAEL, 1994):

$$[vv] = \min; \quad [ppv] = \min \quad (11)$$

onde o colchete indica somatório, com variação subentendida de 1 a n, e sem utilizar expoentes. Modernamente prefere-se a linguagem matricial:

$$V^T V = \min \rightarrow V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T = \text{vetor coluna dos resíduos} \quad (12)$$

e no caso mais geral,

$$V^T P V = \min \quad (13)$$

sendo P uma matriz quadrada, matriz dos pesos.

GEMAEL (1994) apresenta a aplicação do MMQ da seguinte forma: Admitindo-se que o valor L represente observações (o que indicaremos por L_b), há dois fatos a considerar:

- a) Usualmente em Geodésia o número de observações é superior ao de incógnitas:

$$n A_u \ u X_1 = L_{n \times 1}^b; \ n = n^\circ \text{ de observações} > u = n^\circ \text{ de incógnitas}; \quad (14)$$

- b) As observações vêm eivadas dos inevitáveis erros de medida que tornam o sistema “inconsistente”; as observações L_b não são compatíveis com o modelo matemático (14).

A introdução de correções (resíduos) $V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T$ no modelo anterior

$$A \hat{X} = L_b + V = L_a \quad (15)$$

com \hat{X} = estimador de X , pode remover a inconsistência no entanto ocorre o problema inverso: apresenta mais incógnitas do que equações. O vetor L_a que satisfaz o modelo depende (e com ele o estimador \hat{X} de X) da escolha de V .

No caso de observações diretas as nossas incógnitas são os valores observados ajustados. Agora, no caso de observações indiretas, queremos estimar grandezas que se vinculam às observadas; para distingui-las das primeiras é usual designa-las de parâmetros, o que explica a denominação, mais corrente em nossos dias, de método paramétrico (GEMAEL, 1994). Sejam: L_b = vetor ($n \times 1$) dos valores observados; V = vetor ($n \times 1$) dos resíduos; L_a = vetor ($n \times 1$) dos valores observados ajustados:

$$L_a = L_b + V \quad (16)$$

X_o = vetor ($u \times 1$) cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros; X = vetor correção ($u \times 1$); X_a = vetor dos parâmetros ajustados :

$$X_a = X_o + X \quad (17)$$

Segundo GEMAEL (1994) diz que o ajustamento se processa pelo método paramétrico quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático

$$L_a = F(X_a) \quad (18)$$

Substituindo o primeiro membro pela (16) e linearizando por Taylor:

$$L_b + V = F(X_o + X) = F(X_o) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_o} X \quad (19)$$

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_o :

$$L_o = F(X_o) \quad (20)$$

e a matriz das derivadas parciais por A :

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_o} \quad (21)$$

a (19) se escreve sucessivamente:

$$L_b + V = L_o + AX,$$

$$V = AX + L_o - L_b$$

E, finalmente, fazendo:

$$L = L_o - L_b \quad (22)$$

obtemos o modelo matemático linearizado do método dos parâmetros:

$${}_n V_1 = {}_n A_u {}_u X_1 + {}_n L_1 \quad (23)$$

Minimizando a forma quadrática fundamental (13) obtém-se:

$$\phi = V^T P V = (AX + L)^T P (AX + L) = \min \quad (24)$$

$$\phi = (A^T X^T + L^T) P (AX + L) = A^T X^T P A X + A^T X^T P L + L^T P A X + L^T P L = \min$$

$$\phi = A^T X^T P A X + 2 A^T X^T P L + L^T P L = \min$$

Igualando a zero a derivada primeira em relação a X:

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = 2A^T P A X + 2A^T P L = 0$$

$$A^T P A X + A^T P L = 0 \quad (25)$$

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (26)$$

A conceituação do Método de Colocação por Mínimos Quadrados parte do modelo paramétrico explicitamente linear, exposto acima (GEMAEL, 1994):

$$L_a = L_b + V = AX_a \quad (27)$$

a solução mínimos quadrados é dada por:

$$X_a = (A^T P A)^{-1} A^T P L_b \quad (28)$$

A fórmula básica da Colocação é uma generalização da (27)

$$L = AX_a - V = AX_a + n + s' \quad (29)$$

na qual o vetor dos resíduos é substituído pelo vetor do ruído n (sinal oposto), além do acréscimo de uma nova grandeza, o sinal s' (GEMAEL, 1994).

Na notação de MORITZ(1980) o vetor das observações é designado por l e a (29) assume a forma:

$$l = AX + n + s \quad (30)$$

O importante é observar que na fórmula básica da Colocação uma observação geodésica pode ser considerada formada por três partes:

- AX = parte sistemática que traduz, por exemplo, o efeito nos cálculos do modelo geométrico adotado;
- n = o ruído, parte aleatória correspondente aos “erros de medida”;
- s = o sinal, parte aleatória representando em problemas de Geodésia Física os efeitos do campo anômalo.

A novidade está no sinal, que numa acepção mais ampla pode ser considerado como a parte não modelada de uma “observação sem erro”. Observações são realizadas em um número limitado de pontos nos quais estão presentes as duas grandezas aleatórias n e s ; mas o sinal existe também em pontos onde não são realizadas observações e tem caráter contínuo, o que permite a sua utilização em interpolação (MORITZ,1980; GEMAEL, 1994)

O modelo matemático básico apresentado em (30) pode ser visualizado por meio da Fig. 3, o termo AX representa uma curva simples e levemente variada; é uma função (linear

ou linearizada) de um número de parâmetros X , por exemplo um polinômio cujos coeficientes formam o vetor X . Outra função s , o sinal, oscila irregularmente em cerca de zero, é sobreposto a AX , dando a função $AX + s$. O problema é determinar esta curva $AX + s$, mostrado em cima (linha azul) por meio de l observações discretas (pontos pretos numerados de 1 a 9), que são mais adiante afetadas por erros nas observações n (ruído). A curva $AX + s$ interpolada consiste em uma parte sistemática AX , representando a tendência geral do fenômeno, e uma parte aleatória s , representando contínuas flutuações irregulares, também do fenômeno físico. Em contraste com o sinal s , a outra quantidade aleatória n , o erro das observações, ocorre somente nos pontos observados e é assim discreto (MORITZ,1980).

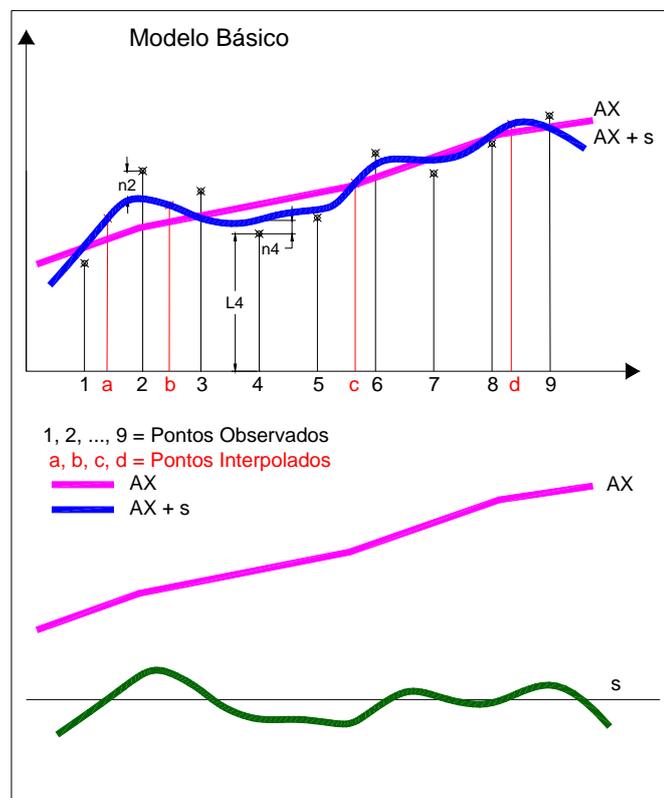


Fig. 3 - Esquema mostrando o Modelo Básico de Colocação por Mínimos Quadrados
Fonte: Adaptado de MORITZ(1980).

GEMAEL (1994) considera a determinação do parâmetro X um ajustamento, a remoção do ruído uma filtragem, e a computação de s para pontos diferentes dos pontos medidos como predição, diz que o presente modelo combina ajustamento, filtragem e interpolação. Então em resumo:

Determinação de X = AJUSTAMENTO

Remoção do ruído n = FILTRAGEM

Cálculo de s em pontos que não os de medida = INTERPOLAÇÃO

AJUSTAMENTO + FILTRAGEM + INTERPOLAÇÃO = COLOCAÇÃO

Segundo MORITZ (1980) a relevância deste modelo para problemas geodésicos pode ser vista mencionando-se algumas aplicações concebíveis de campos bastante diferentes de geodésia.

- a) Medidas de gravidade: Aqui em l estão as leituras obtidas pelo gravímetro, s representa a anomalia de gravidade Δg , n é o erro aleatório medido, e X representa os parâmetros sistemáticos de dois tipos diferentes: a) os parâmetros da fórmula da gravidade normal e b) as constantes instrumentais e outros efeitos sistemáticos na medida como o vento. Assim, $g = \gamma + \Delta g = AX + s$; onde a gravidade normal γ pode ser calculada com fórmula internacional associada ao modelo adotado; representa a parte sistemática da observação e a anomalia da gravidade Δg é o sinal, consequência do potencial perturbador que gera o campo anômalo. O conhecimento de γ e Δg nos pontos de medida permite a construção da curva $\gamma + \Delta g = AX + s$ que fornecerá os valores de g em pontos onde não se processam observações.
- b) Observações de satélites: Aqui l inclui medidas realizadas por satélites artificiais, AX representa a órbita normal (depois da linearização com respeito aos parâmetros), s representa perturbações gravitacionais da órbita, e n inclui outros efeitos aleatórios, em particular erros nas medidas.
- c) Transformações em Geodésia e Fotogrametria: Considere sobrepor dois sistemas de coordenadas geodésicas locais. Se um sistema é transformado no outro, lá pode permanecer discrepâncias residuais ou distorções que são irregulares, mas fortemente correlacionadas. Assim AX representa a fórmula de transformação, s inclui as distorções residuais, e n é o efeito do erro posicional medido. Isto é uma transformação combinada e um problema de interpolação que é um problema bidimensional análogo ao problema unidimensional mostrado na Fig. 3. Problemas de transformações da mesma natureza são freqüentes também em Fotogrametria.
- d) Erros de graduação em teodolitos: Aqui l é a leitura do círculo, AX representa o erro de graduação regular, s representa o erro de graduação irregular, e n é o erro de leitura.

Retornando-se ao desenvolvimento do modelo matemático, segundo GEMAEL (1994), onde denomina o vetor das observações l por x e o dimensionamento das matrizes por:

$${}_q X_1 = {}_q A_m {}_m X_1 + {}_q s_1 + {}_q n_1 \quad (31)$$

onde: q = número de observações e m = número de incógnitas. A parte aleatória sob a forma de um vetor z :

$$z = n + s \quad (32)$$

resultando em

$$z = x - AX \quad (33)$$

expressão que representa as chamadas observações centradas, isto é, observações (x) das quais foi subtraído o seu valor médio ($AX = E\{x\}$ porque $E\{n\}=E\{s\}=E\{z\} = 0$).

Mas na interpolação deseja-se calcular o sinal s nos pontos de cálculo denominado agora de s' : designando por p o número de tais pontos, resulta o vetor $s'_{p \times 1}$ que deve ser introduzido. GEMAEL, 1994 apresenta o seguinte artifício: a definição de um novo vetor,

$$v = \begin{bmatrix} s' \\ z \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$v = [s'_1 \ s'_2 \ \dots \ s'_p s_p + n_1 \ s_2 + n_2 \ \dots \ s_p + n_p]^T \quad (35)$$

Que substituindo a (33) pela expressão equivalente resulta em:

$$x - AX - Bv = 0 \quad (36)$$

onde $B = [0 \ I] \rightarrow Bv = z;$ (37)

$$B_{(q \times p+q)}; \quad 0_{(p \times p)}; \quad I_{(q \times q)}.$$

A matriz variância-covariância do vetor $v_{(p+q \times 1)}$, assume a forma:

$$\Sigma_v = \begin{bmatrix} \Sigma_{s'} & \Sigma_{s'z} \\ \Sigma_{zs'} & \Sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{s'} & \Sigma_{s'x} \\ \Sigma_{xs'} & \Sigma_x \end{bmatrix} \quad (38)$$

sendo: $\Sigma_{s'}$ = matriz variância-covariância do sinal nos pontos de cálculo, deve ser conhecida;

Σ_x = matriz variância-covariância das observações = matriz variância-covariância do vetor z ;

$\Sigma_{s'x}$ = matriz covariância cruzada entre os vetores s' e x (só reúne covariâncias).

A matriz variância-covariância do ruído é dada por:

$$\Sigma_n = E\{(n - E\{n\})(n - E\{n\})^T\} = E\{n n^T\} \quad (39)$$

e a matriz variância-covariância do sinal nos pontos de observação:

$$\Sigma_s = E\{s s^T\} \quad (40)$$

GEMAEL (1994) observa que, no pressuposto de serem n e s não correlacionados, vale a expressão:

$$\Sigma_x = \Sigma_s + \Sigma_n \quad (41)$$

e também que

$$\Sigma_{s'x} = \Sigma_{s's} \quad (42)$$

isto é, uma matriz covariância cruzada (não tem variâncias) que só envolve sinais, nos pontos de observação s e nos pontos de cálculo s' .

Uma relação das fórmulas utilizadas na interpolação por colocação sem demonstração e sem maiores detalhes é apresentado em GEMAEL(1994):

a) Parâmetros:

$$\begin{aligned} Xa &= (A^T \Sigma_{Lb}^{-1} A)^{-1} A^T \Sigma_{Lb}^{-1} L_b \\ X &= (A^T \bar{C}^{-1} A)^{-1} A^T \bar{C}^{-1} x \end{aligned} \quad (43)$$

O termo Σ_{Lb} da fórmula (43) envolve além do ruído (resíduo) o sinal.

b) Sinal (nos pontos de cálculo):

$$\begin{aligned} s' &= \Sigma_{s'} L_b \Sigma_{Lb}^{-1} (L_b - AX) \\ s' &= C_{s'x} C_{xx}^{-1} (x - AX) \end{aligned} \quad (44)$$

c) Interpolação:

$$t = \bar{A}X + s' \quad (45)$$

d) Estimativa do Erro:

$$E_{s's'} = C_{s's'} - C_{s'x} (C_{xx})^{-1} (C_{s'x})^T \quad (46)$$

$E_{s's'} = \sigma_{s's'}^2$ = estimativa do erro nos pontos interpolados

$C_{s's'}$ = matriz variância-covariância nos pontos de cálculo

A relação das matrizes necessárias são as seguintes :

Matriz variância-covariância das observações:

$$\begin{aligned} \Sigma_{Lb} &= \Sigma_x = \Sigma_n + \Sigma_s \\ C_{xx} &= \bar{C} = C + D = C_{nn} + C_{ss} \end{aligned} \quad (47)$$

onde $\Sigma_n = C = C_{nn}$ = matriz variância-covariância do ruído;

$\Sigma_s = D = C_{ss}$ = matriz variância-covariância do sinal nos pontos de observação.

Matriz covariância cruzada

$$C_{s'x} = \text{cov}(s', s) = \Sigma_{s's} \quad (48)$$

envolve somente sinais, tanto nos pontos de observação s e nos pontos de cálculo s' .

As matrizes $C_{s's'}$, C_{ss} e $C_{s's}$ podem ser obtidas a partir da função covariância conhecida pelos geodestas nos problemas de interpolação.

Para esclarecer melhor o Método de Colocação por Mínimos Quadrados aqui exposto, um exemplo é apresentado no Apêndice A.

2.3. CONTROLE DA QUALIDADE EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

A precisão de MDEs é um assunto do interesse tanto dos seus produtores como dos seus usuários. Para um projeto de um MDE a precisão, eficiência e economia são os três

fatores a serem considerados. A precisão é o único fator mais importante a ser considerado porque se a precisão de um MDE não é conhecida então todo o projeto necessitará ser repetido e assim a economia e eficiência será no final afetada (LI *et al*, 2005)

Um MDE é uma representação tridimensional da superfície terrestre. Inevitavelmente, alguns erros estarão presentes em cada uma das três dimensões de coordenadas espaciais (X, Y, Z) dos pontos que existem na superfície do MDE. Duas destas coordenadas (X e Y) são combinadas para se obter o erro planimétrico (horizontal) enquanto a terceira é a direção vertical (Z) e é tratada como o erro de elevação (ou altitude) (LI *et al*, 2005).

Segundo LI *et al* (2005) a avaliação da precisão de MDE pode ser tratada em duas diferentes formas, que são: a precisão planimétrica e a precisão altimétrica podendo ser avaliadas separadamente ou ambas podem ser avaliadas simultaneamente. Na primeira opção o resultado da precisão para a planimetria pode ser obtido separadamente da precisão dos resultados na direção vertical. Entretanto, na segunda forma, uma medida da precisão para ambos componentes do erro é requerida.

LI *et al* (2005) apresenta quatro possíveis aproximações para a avaliação da precisão altimétrica de um MDE:

- a) Predição por produção (procedimentos): a avaliação dos prováveis erros introduzidos nos vários estágios de produção juntos com uma avaliação da precisão vertical das fontes materiais. A precisão do MDE final é consequência ou concatenação dos erros envolvidos em todos os estágios.
- b) Predição por área: baseada no fato de que a precisão vertical das curvas de nível de mapas topográficos é altamente correlacionável com a declividade média da área.
- c) Avaliação através de testes de carta: trata de uma avaliação experimental, discutido por muitos, onde o modelo inteiro é testado. Para tal avaliação, é necessário um conjunto de pontos de teste.
- d) Avaliação através de pontos de diagnóstico: Em uma amostra de alturas é adquirida dos materiais fonte na hora da aquisição dos dados e este conjunto de dados é usado para conferir a qualidade do modelo. Isto pode ser administrado em qualquer estágio de produção, tanto no intermediário como também no final.

Há três aproximações para avaliar a precisão planimétrica de um MDE, são elas:

- a) Nenhum erro: É discutido que um MDE fornece para uso um conjunto de alturas com posições planimétricas que são inerentemente precisas.
- b) Preditiva: Semelhante à predição por área usada para precisão vertical.

c) Por altura: Fixar as posições de alturas dos nodos comparando umas séries de pontos.

Porém, é difícil de trazer estes testes para a prática. Esta é talvez a razão por que o assunto da precisão planimétrica raramente seja focalizado.

Uma alternativa de aproximação é a avaliação da precisão vertical e horizontal simultaneamente. Fazendo assim, uma medida capaz de caracterizar a precisão em três dimensões é necessária. LEY (1986 *apud* LI *et al*, 2005, p. 160) sugeriu usar uma medida comparativa das médias de declives entre a superfície do MDE e a superfície de terreno original. Outros também consideraram o uso de parâmetros geomorfométricos como também pontos e linhas de característica do terreno. Porém, não há consenso. A maioria dos usuários segue realiza somente uma avaliação da precisão vertical desconsiderando a precisão horizontal.

PARADELLA *et al* (2005) investigou a viabilidade de geração de carta topográfica com estéreo-pares Fine Mode do Radarsat-1 e dados ETM+ Landsat7 em ambiente de relevo montanhoso da Província Mineral de Carajás (Pará). Para tanto foram realizados testes com pontos de controle para a estimativa da acurácia planimétrica e altimétrica dos dados gerados. A pesquisa mostrou que a acurácia planialtimétrica da carta topográfica atendeu aos requisitos de mapeamento na escala de semi-detelhe 1:100.000, classe B, do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nacional. Para os cálculos das acurácias de altimetria e planimetria foram utilizados critérios do erro linear e erro circular com 90% de intervalo probabilísticos. O uso do intervalo de confiança com 90% de probabilidade assegura que é 90% a probabilidade do intervalo conter o valor médio “verdadeiro” da altimetria ou da planimetria calculados. O LE90 (Erro Linear com 90% probabilístico) é usado internacionalmente para quantificar o erro em elevação do MDE versus medidas reais em elevação (elevação verdadeira). O CE90 (Erro Circular com 90% probabilístico) é uma medida dos erros combinados em latitude e longitude da planimetria do produto, sem relação com a acurácia vertical. CE90 é um raio circular (metros), englobando 90% dos erros de planimetria no produto analisado, em relação às posições reais no terreno.

No cálculo do LE90, as seguintes relações são utilizadas:

$$LE90 = 1,6449 \times EMQ_v \quad (49)$$

onde:

$$EMQ_v = \sqrt{\frac{\sum (Z_P - Z_{MDE})^2}{N - 1}} \quad (50)$$

Sendo Z_p = altitudes dos pontos da verdade terrestre; Z_{MDE} = altitudes interpoladas no MDE; N = número de pontos considerados.

Da mesma forma, no cálculo do CE90 as seguintes relações são utilizadas:

$$CE90 = 2,15 \times EMQ_h \quad (51)$$

onde:

$$EMQ_h = \sqrt{\frac{\sum (X_p - X_{MDE})^2 + \sum (Y_p - Y_{MDE})^2}{N - 1}} \quad (52)$$

Sendo X_p e Y_p = coordenadas dos pontos da verdade terrestre; X_{MDE} e Y_{MDE} = coordenadas dos pontos no MDE; N = número de pontos considerados.

Os valores das constantes em LE90 e CE90 (1,6449 e 2,15) são valores tabulados para 90% de probabilidade da distribuição normal.

No Brasil as cartas topográficas devem obedecer quanto à acurácia planialtimétrica, ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, que é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade e que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o erro padrão ou desvio padrão (PEC = 1,6449 x Erro Padrão), conforme o Decreto Lei número 89817 de 20/06/1984, que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da Comissão de Cartografia do Brasil (COCAR). Neste decreto as cartas topográficas são classificadas nas classes A, B e C, segundo os critérios de PEC planimétricos e altimétricos, sendo também consideradas equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio Padrão e Erro Médio Quadrático(EMQ).

Quadro 2: Resumo da classificação de Cartas segundo ao PEC.

PEC - PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICO

| Classe A | PEC | Erro Padrão |
|---------------------|---|---|
| Planimétrico | 0,5mm x Escala Carta | 0,3mm x Escala da Carta |
| Altimétrico | 1/2 x equidistância das curvas de nível | 1/3 x equidistância das curvas de nível |
| Classe B | | |
| Planimétrico | 0,8mm x Escala Carta | 0,5mm x Escala da Carta |
| Altimétrico | 3/5 x equidistância das curvas de nível | 2/5 x equidistância das curvas de nível |
| Classe C | | |
| Planimétrico | 1,0mm x Escala da Carta | 0,6mm x Escala da Carta |
| Altimétrico | 3/4 x equidistância das curvas de nível | 1/2 x equidistância das curvas de nível |

Muitos estudos sobre a avaliação de MDEs foram e estão sendo desenvolvidos por pesquisadores do Brasil tais como:

SANTOS (2001) desenvolveu uma dissertação que propõe uma metodologia para avaliação da qualidade na construção de MDTs, a partir de diferentes fontes de aquisição de dados, acessíveis no Departamento de Cartografia do IBGE. Para alcançar ao objetivo, foram construídos sete modelos digitais do terreno: três na escala de 1:50.000 e quatro na escala de 1:25.000. Foram utilizadas três distintas fontes de dados: conversão de originais cartográficos disponíveis na forma clássica, em desenho; originais de estereocompilação fotogramétrica disponíveis em forma numérica, como resultantes do uso de equipamentos fotogramétricos repotencializados; e originais de estereocompilação em estação fotogramétrica digital. Os resultados revelam que se pode utilizar, sem restrições, os novos equipamentos de fotogrametria (estações fotogramétricas digitais – EFD) e os equipamentos clássicos analógicos repotencializados, na produção de MDTs. Discute-se ainda, a oportunidade do uso da digitalização dos originais cartográficos como fonte para a construção dos MDTs.

ITAME (2001) propõe um método de controle da qualidade em Modelos Digitais de Terreno (MDT). Nesse trabalho, levantamentos topográficos foram realizados utilizando-se estações totais para a aquisição dos pontos amostrais aleatoriamente espaçados. Modelos Digitais do Terreno (MDTs) foram gerados empregando-se a triangulação de Delaunay e a interpolação por *B-Spline* com diferentes números de pontos amostrais. Uma análise estatística foi realizada para a determinação da densidade mínima de pontos amostrais necessária para avaliação de MDTs. Esse trabalho constatou que a densidade mínima de pontos necessária depende da declividade do terreno.

Como referência na área de avaliação da qualidade de produtos cartográficos ROCHA (2002) desenvolveu uma tese apresentando proposta de Padrões de Exatidão Cartográfica a ser aplicado na cartografia digital urbana, tendo em vista as necessidades dos usuários. Para tanto, identifica as necessidades cartográficas para gerenciamento urbano, define o tamanho da amostra a ser utilizada, o método de levantamento de pontos teste, a distribuição espacial desses pontos, a medição e os testes de hipóteses. Apresenta um estudo de caso aplicando os padrões propostos a um mapa digital urbano, testando dessa maneira a qualidade geométrica do documento cartográfico. Nesse mesmo sentido, NOGUEIRA JUNIOR (2003) em dissertação, investigou os problemas relacionados ao controle de qualidade tendo em vista a cartografia digital, incluindo o Decreto Lei 89.817, apresentando um estudo detalhado sobre amostragem visando identificar o número de pontos necessários no controle de qualidade posicional baseado em fundamentos científicos. O Decreto Lei 89.817, 20 de junho de 1984, define um Padrão de Exatidão Cartográfica esse documento regulamenta o controle de qualidade dos documentos cartográficos no Brasil. No capítulo II, artigos 8º e 9º

estabelecem a forma de classificação de um documento cartográfico segundo a sua qualidade geométrica.

Uma proposta de metodologia para análise entre MDEs que foram gerados a partir de imagens do sensor ASTER e de cartas topográficas digitalizadas, escala 1:50.000, em uma região com alta variação de elevação, planalto meridional Sul do Brasil, foi realizada em monografia de DRUZINA (2005). O estudo realiza primeiramente uma análise entre superfícies com a utilização de histogramas bidimensionais na detecção de erros grosseiros e sistemáticos existentes nos MDEs, em seguida avalia estatisticamente cada modelo, separadamente, utilizando pontos de controle. Mostrou a inviabilidade de se gerar MDEs a partir de imagens que apresentem área de cobertura de nuvens maior ou igual a 5%.

LEMOS *et al* (2004), realizaram comparações de curvas de nível geradas pelo SRTM, com curvas de nível existentes em cartas topográficas e as diferenças entre o SRTM e as referências de nível encontradas na região de estudo. Os resultados obtidos demonstraram que para muitas aplicações, o SRTM pode substituir os modelos topográficos digitais obtidos a partir de mapas topográficos na escala 1:250.000.

Como não há um consenso quanto a forma de avaliação da qualidade de MDEs e devido a grande quantidade de dados a serem utilizados neste trabalho somente a precisão vertical será abordada através de uma avaliação por pontos de diagnóstico seguindo procedimentos propostos por PARADELLA *et al* (2005).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para o desenvolvimento, desta pesquisa, foi o município de Porto Alegre/RS. Fundado em 26 de março de 1772, limitado aproximadamente pelos meridianos $51^{\circ}01'W$ e $51^{\circ}18'W$ e paralelos $29^{\circ}56'S$ e $30^{\circ}16'S$, é a capital mais meridional do Brasil, apresenta espaços de planície e também 40 morros que abrangem 65% da sua área limitada por uma orla fluvial de 72km. A disponibilidade de dados altimétricos com precisão conhecida, dados controlados, e a diversidade de relevo foram os fatores relevantes na seleção dessa área. Para facilitar o desenvolvimento do trabalho, a área foi dividida em três diferentes regiões que apresentassem características de relevo diferentes (denominadas como áreas: plana, mista e acidentada). A figura 4 mostra a localização das áreas e os bairros que compreendem, sendo que, os limites (Quadro 3) estão em coordenadas geodésicas, referidas ao datum WGS84 (*World Geodetic System 1984*).

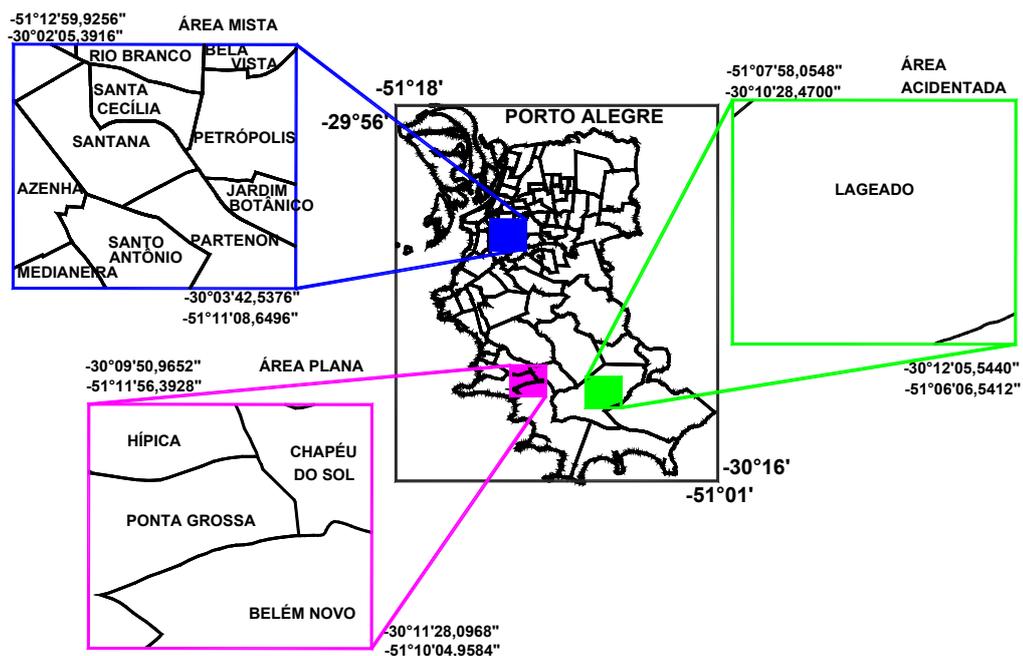


Fig. 4: Mapa de Localização das Áreas de Estudo com os bairros abrangentes.
Fonte: PROCEMPA, 2006 - Mapa Digital Oficial de Porto Alegre

Quadro 3: Limites das áreas de estudo – Datum WGS84

| ÁREAS | LIMITES | COORDENADAS UTM | | COORDENADAS GEODÉSICAS | |
|------------|-----------------|-----------------|-------------|------------------------|------------------|
| | | E (m) | N (m) | LATITUDE | LONGITUDE |
| PLANA | <i>Superior</i> | 480838,728 | 6663007,758 | 30°09'50,9652" S | 51°11'56,3928" W |
| | <i>Inferior</i> | 483823,728 | 6660022,758 | 30°11'28,0968" S | 51°10'04,9584" W |
| MISTA | <i>Superior</i> | 479112,279 | 6677335,332 | 30°02'05,3916" S | 51°12'59,9256" W |
| | <i>Inferior</i> | 482097,279 | 6674350,332 | 30°03'42,5376" S | 51°11'08,6496" W |
| ACIDENTADA | <i>Superior</i> | 487214,906 | 6661862,627 | 30°10'28,4700" S | 51°07'58,0548" W |
| | <i>Inferior</i> | 490199,906 | 6658877,627 | 30°12'05,5440" S | 51°06'06,5412" W |

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS

4.1.1. Imagem ASTER

A imagem do sensor ASTER utilizada neste trabalho foi cedida pela 1ª Divisão de Levantamento do Exército. Atualmente é cobrada uma taxa de US\$60 por *download* de uma imagem ASTER 1A ou 1B. Estas imagens podem ser acessadas através do site da NASA – EOS (*Earth Observing System*) Data Gateway : <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> .

A imagem deste trabalho foi registrada em 12 de setembro de 2003 as 13:35h e não apresenta cobertura de nuvens. O número de órbita da imagem ASTER é 19866 e as coordenadas de centro da cena são -29.9347° , -51.1820° . Nas figuras 5 e 6 são apresentadas as bandas 3N (visada “Nadir”) e 3B (visada “*Backwards*”) respectivamente, utilizadas na geração do MDE.

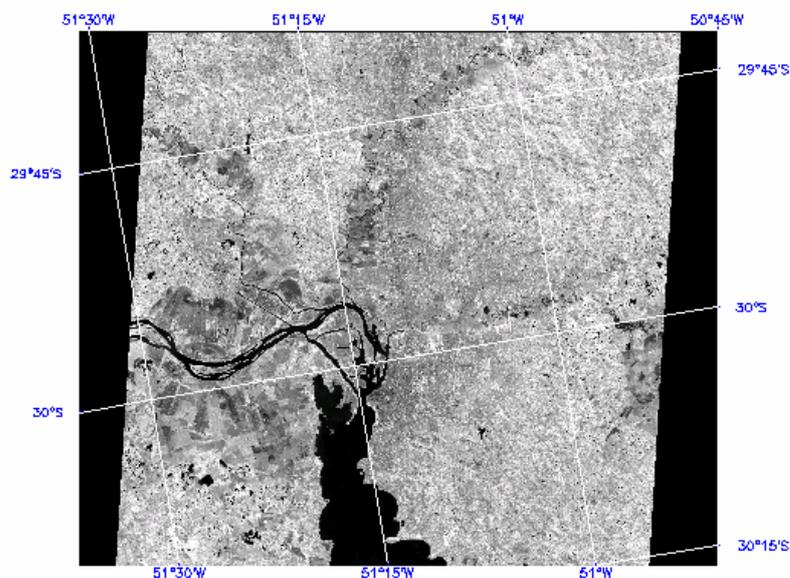


Fig. 5: Banda 3N – Imagem ASTER de 12/09/2003

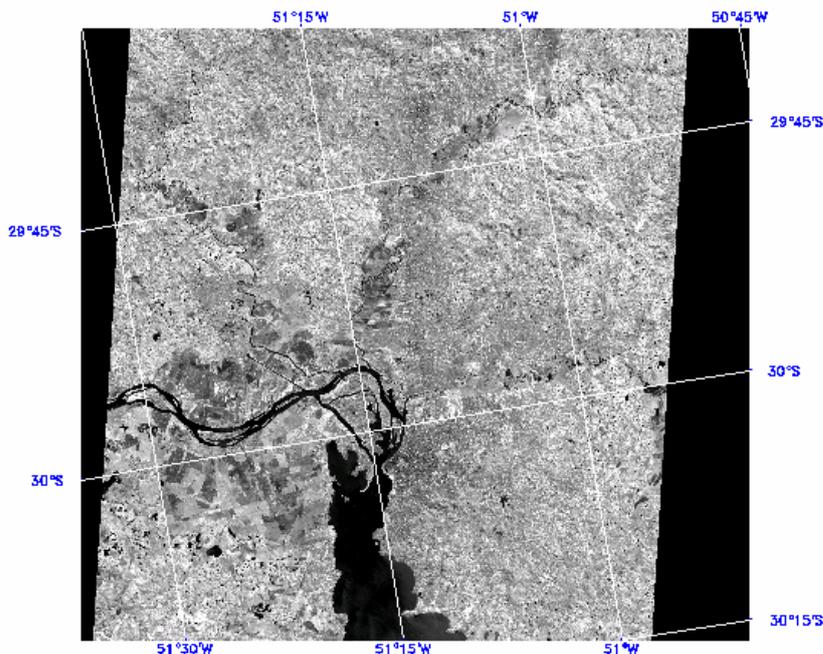


Fig. 6: Banda 3B – Imagem ASTER 12/09/2003

O formato HDF (*Hierarchical Data Format*) dos dados ASTER, independe da plataforma utilizada e sua estrutura lógica apresenta-se dados auto-descritivos, permitindo a inclusão de uma grande quantidade de dados de diferentes tipos e origens em um mesmo arquivo. Um arquivo HDF contém, além das imagens propriamente ditas, dados de calibração, navegação, informações a respeito da missão, características do sensor, indicadores de qualidade, tipo e lugar do processamento, estação receptora, tempo de início e fim da tomada da imagem, referências geográficas, entre outros.

O nível de processamento da imagem é o 1B apresentando um conjunto (formato HDF) composto de 4 arquivos: 1º) três bandas do VNIR (Visível e Infravermelho Próximo), 2º) a banda 3B (Infravermelho Próximo), 3º) as seis bandas do SWIR (Infravermelho Médio) e 4º) as cinco bandas do TIR (Infravermelho Termal). O nível 1B já traz a imagem corrigida geométrica e radiométricamente, sendo adotado o sistema geodésico de referência WGS84 e as coordenadas planas na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). Os dados são produzidos no "ASTER Ground Data System (GDS)", que se situa em Tóquio, no Japão e enviados para o "U. S. Geological Survey - EROS Data Center's (EDC)" e para o "NASA - Distributed Active Archive Center (DAAC)", aonde são armazenados, distribuídos e processados para os níveis de processamento 2 e 4.

Quadro 4: Algumas características das imagens ASTER nível 1B

| |
|--|
| Nome do granulado: AST_L1B |
| Dimensões: |
| VNIR: 4200 linhas x 4980 colunas; |

| |
|--|
| VNIR (3B): 4600 linhas x 4980 colunas; SWIR: 2100 linhas x 2490 colunas; TIR: 700 linhas x 830 colunas. |
| Tamanho dos arquivos: VNIR (1,2,3N) = 62,748,000 Bytes VNIR (3B) = 22,908,000 Bytes SWIR (4-9) = 31,374,000 Bytes TIR (10-14) = 5,810,000 Bytes Total = 118 Megabytes |
| Projeção: Universal Transverse Mercator (UTM) Datum: WGS84 |
| Formato dos dados: HDF-EOS |

4.1.2. MDE SRTM

Os dados da SRTM adquiridos para o desenvolvimento deste trabalho são os da versão 1 de processamento porque foram acessados em 2004. Atualmente a aquisição destes dados pode ser feita gratuitamente via FTP, <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/>. O site oficial sobre o SRTM, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, apresenta um novo produto denominado versão 2, que é resultado de um esforço significativo de edição realizado pela NGIA (*National Geospatial Intelligence Agency*), a qual exhibe corpos de água e linha litorânea melhor definidas, ausência de pontos e *pixels* com valores espúrios, embora existam ainda algumas áreas com a falta de dados.

Os arquivos são disponibilizados com extensão HGT (*Height*) compactados, cobrindo áreas de 1° por 1° no terreno, sendo as mesmas referenciadas por seu canto inferior esquerdo em coordenadas geodésicas (ex: S30W051.hgt.zip). Cada arquivo tem aproximadamente uma linha e uma coluna de sobreposição com os arquivos correspondentes às áreas de sua vizinhança. O sistema de coordenadas é o geodésico sendo utilizado o *datum* WGS84. As altitudes são dadas em metro e possuem um referencial ortométrico que foi obtido com base no modelo geoidal global EGM96 (FAR *et al*, 2007).

Um recorte para a área do município de Porto Alegre, (30°00'S, 51°15'W – limite superior esquerdo e 30°15'S, 51°00'W – limite inferior direito) foi realizado no arquivo de nome S31W052.hgt (Fig. 7).

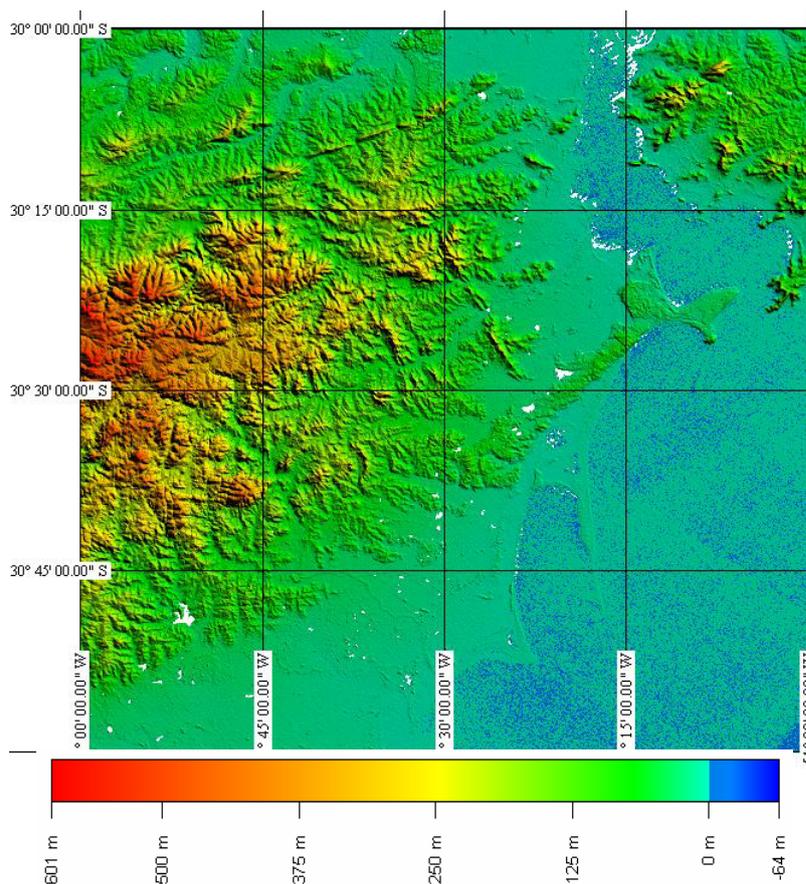


Fig. 7: MDE SRTM – área de 1° por 1° - arquivo S31W052.hgt

4.1.3. Curvas de Nível Vetorizadas com equidistância de 20m

As curvas de nível equidistantes de 20m foram extraídas de carta topográfica 1:50.000 do município de Porto Alegre, nomenclatura SH.22-Y-B-III-2, MI-2987/2, realizada pela Diretoria de Serviço Geográfico do Brasil onde as fotografias aéreas foram realizadas em 1975, o apoio de campo em 1976, a restituição fotogramétrica executada em aparelho de 2ª ordem em 1977, sendo a sexta impressão em 2000. A projeção cartográfica é a UTM (*Universal Transversa de Mercator*), *datum* horizontal Córrego Alegre/MG e o *datum* vertical Marégrafo de Torres/RS. Limites em coordenadas geodésicas: superior esquerdo -30°00', -51°15' e inferior direito -30°15', -51°00'. Esta carta foi adquirida junto à 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro (1ª DL), em meio digital, sendo um arquivo imagem e também um arquivo vetorial, no formato dwg com somente a representação das curvas de nível. Estas curvas de nível estavam representadas com a altimetria associada ao vetor.

4.1.4. Curvas de Nível Vetorizadas com equidistância de 1m

A Secretaria do Planejamento Municipal (SPM) - Prefeitura Municipal de Porto Alegre cedeu, para o desenvolvimento deste trabalho, uma base altimétrica digital do

município de Porto Alegre, constituída por 101 arquivos vetoriais no formato dwg, apresentando curvas de nível eqüidistantes de 1m. Esta base foi elaborada pela 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro (1ª DL), especialmente para a SPM, a partir da restituição analógica do vôo aerofotogramétrico realizado em 1982/87. Os dados apresentam-se na projeção cartográfica Gauss-Krüger, *datum* horizontal Carta Geral e altitudes ortométricas (a partir de Referências de Nível – Rede Altimétrica de Porto Alegre) *datum* vertical Marégrafo de Imbituba/SC. As curvas de nível nestes arquivos não apresentam os valores altimétricos, ou cotas, associados aos vetores, ou seja, são apenas vetores com coordenadas X e Y.

4.1.5. Pontos de Controle

Pontos de controle determinados com precisão conhecida são necessários em etapas de avaliação e de georreferenciamento de imagens. GOLDANI et al. (2002) desenvolveram um modelo geoidal local para o município de Porto Alegre que permite a determinação de altitudes ortométricas compatíveis com o sistema de nivelamento geométrico municipal com uma precisão melhor que 5cm (4,447cm). Para tanto foram levantados 60 pontos de controle sobre as Referências de Nível (RNs) do município. Estes pontos de controle, coletados com receptores GPS (*Global Positioning System*) de simples frequência, foram utilizados no presente trabalho nas etapas de composição da verdade terrestre e de geração do MDE ASTER. Uma listagem destes pontos com as coordenadas geodésicas referenciadas ao WGS84, altitudes ortométricas, *datum* vertical Marégrafo de Imbituba/SC e suas respectivas precisões, pode ser conferida no Anexo A.

4.2. MÉTODOS

A metodologia aplicada neste trabalho envolve cinco etapas principais:

- 1ª Etapa: Planejamento
- 2ª Etapa: Composição da Verdade Terrestre
- 3ª Etapa: Geração de Modelos Digitais de Elevação a partir de diferentes dados e avaliação do erro existente nesses modelos.
- 4ª Etapa: Geração do Modelo Digital de Elevação Híbrido utilizando o modelo matemático de Colocação por Mínimos Quadrados.
- 5ª Etapa: Avaliação da qualidade do Modelo Digital de Elevação Híbrido gerado.

4.2.1. Primeira Etapa: Planejamento

A primeira etapa denominada de planejamento foi dividida em três itens definidos no início do trabalho: dados para a integração, áreas de estudo e sistema de referência (Fig. 8).

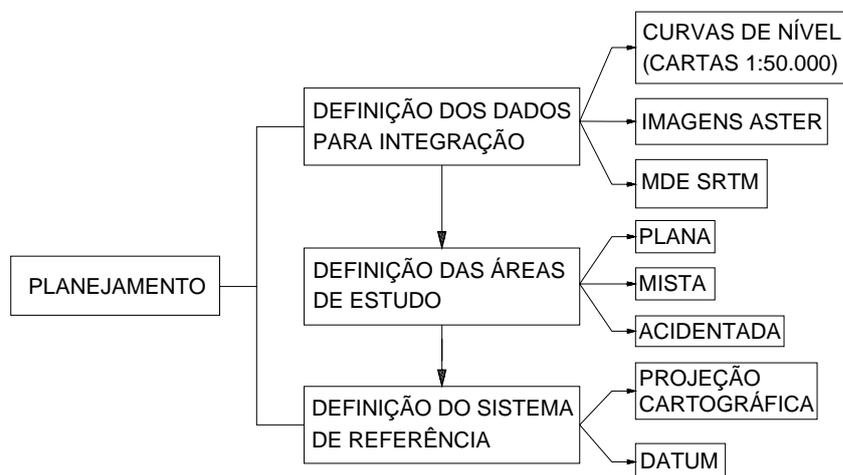


Fig. 8: Fluxograma 1ª Etapa: Planejamento

A definição dos dados para a integração foi realizada visando selecionar diferentes técnicas de extração altimétrica como foi o caso para os seguintes dados: curvas de nível vetorizadas extraídas de Carta Topográfica de Porto Alegre, SH.22-Y-B-III-2 MI-2987/2, escala 1:50.000; estereoscopia de imagens de sensores passivos, Bandas 3N e 3B extraídas de Imagem do sensor ASTER e MDE gerado com dados interferométricos da SRTM..

Com os dados disponíveis para todo o município de Porto Alegre verificou-se a necessidade de uma redução da área principalmente pela dificuldade de processamento de um grande volume de dados. De forma a não perder as características do relevo local e também disponibilizar uma pesquisa mais completa evitando possíveis tendenciosidades, três áreas diferentes foram delimitadas e denominadas como: área plana, área mista e área acidentada, apresentadas na seção 3 deste trabalho.

A definição do sistema geodésico de referência para este trabalho levou em consideração o formato dos dados disponíveis e a necessidade do menor número de conversões entre sistemas a ser realizado. Assim, como sistema geodésico de referência foi adotado o mesmo do MDE SRTM: coordenadas geodésicas, *datum* horizontal WGS84 e altitudes ortométricas.

4.2.2. Segunda Etapa: Composição da Verdade Terrestre

A necessidade de dados controlados, com precisão conhecida, para uma posterior avaliação dos resultados obtidos justifica a segunda etapa do trabalho denominada: Composição da Verdade Terrestre. Esta etapa foi desenvolvida independentemente das demais e subdividida em cinco itens conforme a figura 9:

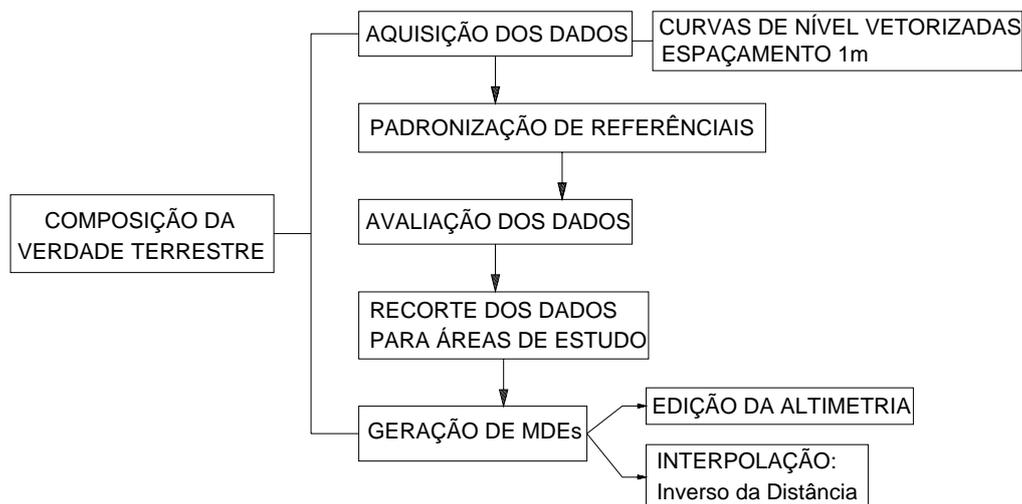


Fig. 9: Fluxograma 2ª Etapa: Composição da Verdade Terrestre

Os dados utilizados na composição da verdade terrestre são as curvas de nível vetorizadas com espaçamento de 1m descritas na seção 4.1.4. Como estes dados se apresentam na projeção cartográfica Gauss-Krüger, *datum* horizontal Observatório Comissão da Carta Geral do Brasil e altitudes ortométricas, *datum* vertical Marégrafo de Imbituba/SC, uma transformação de projeção e de *datum* horizontal foi realizada para que estes dados pudessem estar no sistema geodésico de referência adotado neste trabalho. Através do modelo matemático da Transformação de Similaridade no espaço tridimensional é possível transformar coordenadas de um Sistema Geodésico de Referência em outro, desde que sejam utilizadas coordenadas cartesianas tridimensionais e que Sete Parâmetros: três translações (ΔX , ΔY , ΔZ), três rotações (RX , RY , RZ) e um fator de escala (S) sejam conhecidos. Atualmente os parâmetros de transformação do *datum* Carta Geral e outros sistemas geodésicos de referência são oficialmente desconhecidos. No ano de 2001 a 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro (1ª DL) determinou os sete parâmetros de transformação entre o *datum* Carta Geral e o sistema geodésico WGS84 que mesmo não sendo adotados oficialmente foram utilizados neste trabalho (Quadro 5). Esta transformação foi realizada através do *software* AutoCad Map 2000i, configurado para tal procedimento.

Quadro 5: Parâmetros de Transformação entre Carta Geral e WGS84.

| Parâmetro | Valor |
|----------------|------------------|
| ΔX (m) | -105,3687744788 |
| ΔY (m) | 128,2533004372 |
| ΔZ (m) | 5,9501954062 |
| RX (s) | 0,2526444267 |
| RY (s) | -4,91265506172 |
| RZ (s) | -2,1177220547 |
| S | 0,99998717166457 |

Todos os 101 arquivos vetoriais foram convertidos constituindo uma base vetorial única (em coordenadas geodésicas, WGS84 e altitudes ortométricas) para todo o município de Porto Alegre. Assim, uma avaliação destes dados foi necessária para o conhecimento do erro a priori. Os 60 pontos de controle determinados sobre as Referências de Nível (RN's) da Rede Altimétrica de Porto Alegre (descritos na seção 4.1.5. listados no Anexo A) foram lançados sobre a base e uma comparação altimétrica foi realizada da seguinte maneira: altitude do ponto de controle menos a altitude da curva vizinha mais próxima a este ponto. A tabela abaixo apresenta o resultado obtido:

Tabela 1: Avaliação dos resíduos obtidos por Pontos de Controle menos Curvas (1m).

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Número de Pontos | 60 |
| Valor Mínimo (m) | -0,820 |
| Valor Máximo (m) | 2,700 |
| Média (m) | 0,229 |
| Mediana (m) | 0,070 |
| Desvio Padrão (m) | 0,641 |
| Erro Médio Quadrático (m) | 0,676 |
| Coefficiente de Variação | 2,799 |

Para a estimação da precisão das curvas de nível, foi considerada a precisão da altitude dos pontos de controle de 4,447cm calculada em GOLDANI et al (2002) e o erro médio quadrático calculado acima, segundo a teoria de propagação de erros aleatórios:

$$\text{Precisão Curvas (m)} = \sqrt{(\sigma_A^2 + \sigma_B^2)} \quad (53)$$

Onde: σ_A^2 = Precisão dos pontos de controle = 4,447cm

σ_B^2 = Erro Médio Quadrático da diferença dos pontos de controle e as curvas de nível.

$$\text{Precisão Curvas (m)} = \sqrt{(0,04447)^2 + (0,676)^2} = 0,6775$$

Após esta avaliação, as três áreas de estudo (conforme capítulo 3) foram delimitadas sobre a base vetorial única. Três recortes foram realizados criando-se arquivos

independentes: área plana, área mista e área acidentada. A transformação das curvas de nível vetorizadas em MDEs foi a próxima fase desta etapa, para que estes dados fossem comparados com os demais MDEs gerados neste trabalho. Como já mencionado, as curvas de nível não apresentavam a altimetria associada a cada vetor, encontrando-se descrita em formato texto sobre as curvas mestras e em pontos cotados. Assim, uma edição da altimetria foi realizada através do *software* AutoCad Map 2000i em cada arquivo das diferentes áreas. Cada curva de nível teve a sua coordenada Z, altitude, inserida manualmente. Isto nos três arquivos separadamente.

Concluída a etapa de edição, os três arquivos vetoriais (formato dxf) foram convertidos para o formato texto através do *software* de livre utilização Dxf2xyz Versão 2.0. A geração de MDEs a partir destes dados foi realizada com o *software* Surfer Versão 8.00. A resolução espacial, dimensão da grade regular, destes MDEs foi a mesma dos MDEs a serem avaliados: 15m, 30m e 90m. Ao todo nove MDEs foram gerados, três para cada tipo de área, utilizando-se a interpolação por média ponderada, onde o valor de altitude de cada elemento da grade é definido pela média ponderada dos valores de altitudes das amostras vizinhas, sendo usado como ponderação o Inverso da Distância Euclidiana elevada ao quadrado. A escolha deste método de interpolação se deve a grande densidade de pontos dos arquivos das curvas de nível, grande amostragem, densidade muito maior do que as resoluções dos MDEs a serem avaliados e a necessidade da geração de uma superfície mais próxima possível dos pontos base.

4.2.3. Terceira Etapa: Geração de MDEs a partir de diferentes dados e avaliação do erro existente.

Dados e técnicas de geração diferentes fizeram com que a terceira etapa fosse subdividida em três: MDE Cartas, MDE ASTER e MDE SRTM.

4.2.3.1. MDE Cartas

Para a geração e avaliação de MDE a partir das curvas de nível extraídas de carta topográfica 1:50.000, dados relatados na seção 4.1.3., os procedimentos seguiram a seguinte ordem (Fig. 10):

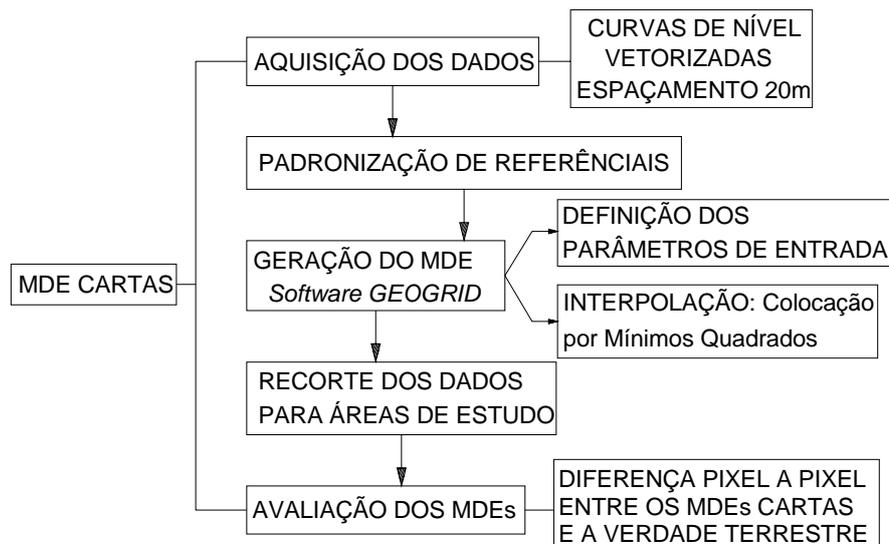


Fig. 10: Fluxograma MDE CARTAS

Após a aquisição do arquivo vetorial de curvas de nível com espaçamento de 20m uma padronização de sistema geodésico de referência e do sistema de coordenadas foi necessária para adequação do dado ao padrão adotado neste trabalho. Portanto, primeiramente uma transformação de *datum* horizontal foi realizada, de Córrego Alegre para o WGS84, através do *software* AutoCad Map 2000i. Em seguida, foi executada uma conversão do sistema de coordenadas planas da projeção UTM para coordenadas geodésicas, latitude e longitude. O *software* AutoCad Map 2000i foi configurado com os parâmetros de transformação oficiais para o Brasil divulgados pelo IBGE.

A geração propriamente dita do MDE a partir destes dados, denominado aqui por MDE Cartas, foi feita através do *software* denominado GEOGRID, desenvolvido em FORTRAN com a finalidade de aplicação na modelagem do geóide, que apresenta dois métodos interpoladores o de Médias Ponderadas e a Colocação por Mínimos Quadrados. Este *software* foi programado pelo geodesta Rene Forsberg do DNSC (Danish *National Space Center*) no ano de 1991 e faz parte do pacote GRAVSOFIT, fornecidos pela Escola do Geóide do IGeS (*International Geoid Service*).

A função covariância, disponibilizada neste programa é o Modelo de Markov de 2ª Ordem:

$$C(d) = C_0 \left(1 + \frac{d}{a}\right) e^{-\frac{d}{a}} \quad (54)$$

onde

d = distância entre os pontos

C_0 , a = parâmetros determinados pelo programa a partir dos dados de entrada.

A definição dos parâmetros de entrada neste programa para a geração do MDE exigiu o estudo da distribuição dos dados assim como também o formato de saída requerido. Entre os parâmetros necessários estão a distância máxima para a interpolação assim como também o número de pontos fechados por quadrante a serem considerados. Foram utilizados 10 pontos por quadrante, 90m de distância máxima para a interpolação que é 3 vezes a resolução espacial adotada para este MDE (30m). Em cada linha do arquivo de entrada foram colocados os dados da seguinte maneira: 1ª coluna a identificação ou número do ponto, 2ª coluna a Latitude do ponto, 3ª coluna a Longitude do ponto, 4ª coluna a Altitude do ponto, 5ª coluna o erro associado a Altitude do ponto. O programa retorna dois arquivos de saída sendo um o *grid* interpolado e outro o erro da interpolação em formato de *grid* também.

Para a determinação deste MDE os dados em formato vetorial (formato dxf) foram convertidos para o formato texto através do *software* de livre utilização Dxf2xyz Versão 2.0. Uma quinta coluna foi adicionada ao arquivo para o erro apriori das altitudes. De forma a simplificar os procedimentos optou-se por assumir como erro apriori dos dados a pior hipótese do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) Altimétrico para uma Carta Topográfica na escala 1:50.000 (Quadro 6). Sendo assim foi adotado o PEC Altimétrico da Classe C, $\frac{3}{4}$ da equidistância das curvas de nível ($\frac{3}{4} \times 20\text{m} = 15\text{m}$) para todos os pontos.

Quadro 6: Padrão de Exatidão Cartográfica para uma Carta na Escala 1:50.000.

| ESCALA 1:50.000 | | |
|------------------------|----------------|------------------------|
| Classe A | PEC (m) | Erro Padrão (m) |
| <i>Planimétrico</i> | 25 | 15 |
| <i>Altimétrico</i> | 10 | 6,67 |
| Classe B | PEC (m) | Erro Padrão (m) |
| <i>Planimétrico</i> | 40 | 25 |
| <i>Altimétrico</i> | 12 | 8 |
| Classe C | PEC (m) | Erro Padrão (m) |
| <i>Planimétrico</i> | 50 | 30 |
| <i>Altimétrico</i> | 15 | 10 |

O MDE Cartas foi então gerado para toda a área do município de Porto Alegre (30°00'S, 51°15'W – limite superior esquerdo e 30°15'S, 51°00'W – limite inferior direito) com resolução espacial de 30m. Três recortes foram realizados neste MDE para as áreas de estudo através do *software* Global Mapper 8.

Para que estes dados pudessem ser utilizados na geração do MDE Híbrido foi necessária uma avaliação destes MDEs de forma que cada pixel apresentasse o erro associado. Assim, os MDEs gerados na seção 4.2.2. foram usados nesta etapa como verdade terrestre. A comparação dos dados interpolados no MDE Cartas com os MDEs Verdade Terrestre foi

realizada através da ferramenta denominada *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00, que pode ser usada para se obter o resíduo, ou diferença, entre o valor de Z de um ponto e o valor de Z interpolado na superfície do modelo, para uma mesma posição X,Y. Os resíduos podem apresentar valores positivos e negativos. O valor de Z de um ponto é maior do que o valor de Z do modelo se o resíduo apresentar valor positivo e o inverso para valor negativo. Então para este cálculo, em cada área de estudo separadamente, foram selecionados como arquivos de entrada: o MDE Cartas em formato texto, ou seja, como uma listagem de coordenadas X,Y e Z e o MDE Verdade Terrestre gerado com resolução de 30m em formato de grid. O programa inseriu os resíduos, calculados *pixel a pixel*, em uma coluna ao lado das coordenadas dos pontos dos MDEs Cartas.

4.2.3.2. MDE ASTER

A geração do MDE a partir da imagem ASTER, denominado MDE ASTER. A figura 11 apresenta a metodologia adotada para a determinação deste MDE:

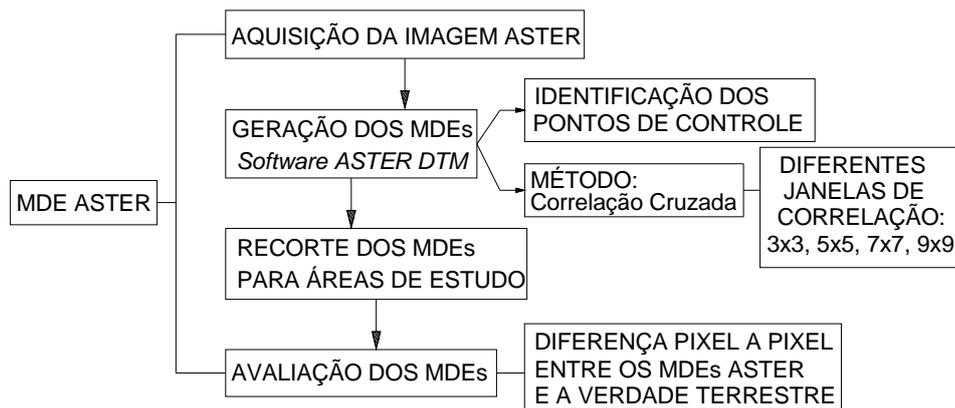


Fig. 11: Fluxograma MDE ASTER

A geração de MDEs a partir do par estereoscópico das imagens, banda 3N e 3B, do sensor ASTER foram realizadas utilizando-se o *software* AsterDTM. O AsterDTM é uma rotina desenvolvida pela SulSoft Serviços em Processamento de Dados, desenvolvido em ambiente IDL (Interactive Data Language) e é utilizada para a extração de MDEs e aplicação de ortocorreções nas imagens do sensor ASTER. Este programa funciona como uma ferramenta dentro do *software* ENVI. Os procedimentos de extração da altimetria utilizam o método denominado de correlação cruzada (“*cross-correlation*”) mesmo método implementado no AsterDTM. O usuário tem a disposição diversas configurações de processamento de MDEs dentro do AsterDTM, como por exemplo a geração com diferentes tamanhos de janelas de correlação. Não existe um padrão a ser utilizado para o tamanho dessas janelas. Como nesta pesquisa as áreas de estudo apresentam diferentes relevos optou-se por gerar MDEs com janelas de correlação nos tamanhos: 3x3, 5x5, 7x7 e 9x9.

Através do AsterDTM pode-se gerar MDEs tanto a partir de imagens brutas, 1A, como também no nível de processamento 1B, caso deste trabalho. Uma das condições do software é que a imagem não seja alterada, que ela esteja em formato HDF original, sem recortes nem correções. Isso porque o software lê a imagem toda para dar início ao procedimento de correlação mesmo que solicitado a gerar um MDE para uma área menor que a cena imageada. Neste trabalho a região delimitada é a mesma da carta 1:50.000 do município de Porto Alegre. O software oferece uma mudança de referencial altimétrico com a utilização de pontos de controle. É importante lembrar que estes pontos de controle devem ser referidos ao mesmo sistema geodésico adotado pela imagem bruta (*datum* WGS84 e projeção UTM), caso haja a necessidade de transformação entre referenciais deve ser realizada após a geração do MDE. Assim um MDE gerado sem a utilização de pontos de controle torna-se um MDE denominado relativo, relativo as condições geométricas dessa imagem e seu sistema geodésico, com o referencial altimétrico de altitudes geométricas. Como neste trabalho o referencial altimétrico adotado é o ortométrico utilizamos os pontos de controle que foram posicionados sobre as RNs do município. Dos 60 pontos de controle disponíveis somente 35 foram bem identificados na imagem. Estes 35 pontos entraram no programa em coordenadas planas UTM, *datum* WGS84 e altitudes ortométricas. O MDE gerado com pontos de controle é denominado MDE absoluto. A listagem com os pontos de controle e seus respectivos erros é apresentada no Anexo B.

Existem opções de geração em diferentes resoluções espaciais: 15m, 30m e 60m. Como as bandas 3N e 3B apresentam resolução espacial de 15m, todos os MDEs ASTER foram gerados com a melhor resolução: 15m.

Ao todo foram gerados quatro MDEs ASTER (janelas 3x3, 5x5, 7x7 e 9x9) com resolução de 15m para a área do município de Porto Alegre. Nestes 4 MDEs foram recortadas as três áreas de estudo: plana, mista e acidentada. Uma análise foi realizada nestes MDEs para a seleção dos dados a serem utilizados na geração do MDE Híbrido. Os dados que compõem a verdade terrestre foram utilizados de duas maneiras, de forma pontual e em formato de MDEs. Em um primeiro momento uma avaliação pontual foi realizada de forma a verificar qual MDE seria utilizado. A ferramenta *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00 foi utilizada para calcular a diferença dos MDEs ASTER e os dados da Verdade Terrestre (em formato texto: como uma listagem de coordenadas X,Y e Z - extensão *.dat). Os resíduos apresentados foram analisados estatisticamente e foi adotado o MDE de menor Erro Médio Quadrático (Tabela 2). Os MDEs que apresentaram menor Erro Médio Quadrático foram os

gerados com uma janela de correlação com a dimensão 7x7 para as áreas Mista e Acidentada e a 9x9 na área Plana.

Tabela 2: Avaliação dos resíduos obtidos pelos MDEs ASTER (gerados com diferentes janelas de correlação) e os dados da Verdade Terrestre – Área Plana, Mista e Acidentada.

| ÁREA PLANA | | | | |
|------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Dimensão da Janela | 3X3 | 5X5 | 7X7 | 9X9 |
| Número de Pontos | 64800 | 64800 | 64800 | 64800 |
| Valor Mínimo | -33,34 | -20,00 | -20,00 | -19,91 |
| Valor Máximo | 54,97 | 46,51 | 20,33 | 11,95 |
| Média | 2,24 | 1,71 | 2,16 | 2,11 |
| Mediana | 3,99 | 3,38 | 3,49 | 3,13 |
| Desvio Padrão | 6,71 | 5,60 | 4,68 | 4,23 |
| Erro Médio Quadrático | 7,07 | 5,86 | 5,15 | 4,73 |
| ÁREA MISTA | | | | |
| Dimensão da Janela | 3X3 | 5X5 | 7X7 | 9X9 |
| Número de Pontos | 311917 | 311917 | 311917 | 311917 |
| Valor Mínimo | -69,67 | -64,95 | -64,36 | -68,37 |
| Valor Máximo | 67,98 | 61,72 | 38,80 | 30,81 |
| Média | -1,26 | -2,50 | -1,95 | -2,56 |
| Mediana | -1,43 | -2,36 | -2,00 | -2,50 |
| Desvio Padrão | 8,23 | 6,34 | 5,68 | 5,70 |
| Erro Médio Quadrático | 8,33 | 6,82 | 6,01 | 6,25 |
| ÁREA ACIDENTADA | | | | |
| Dimensão da Janela | 3X3 | 5X5 | 7X7 | 9X9 |
| Número de Pontos | 357979 | 357979 | 357979 | 357979 |
| Valor Mínimo | -35,75 | -37,00 | -31,84 | -42,65 |
| Valor Máximo | 212,93 | 213,17 | 212,34 | 210,38 |
| Média | -3,13 | -4,27 | -3,42 | -3,75 |
| Mediana | -3,12 | -3,98 | -3,08 | -3,43 |
| Desvio Padrão | 7,80 | 6,68 | 6,08 | 6,79 |
| Erro Médio Quadrático | 8,41 | 7,93 | 6,98 | 7,75 |

Resolução espacial dos MDEs = 15m

Os dados que compõem a verdade terrestre foram então utilizados em formato de MDEs em uma nova análise com o objetivo de se obter o erro associado a cada *pixel* dos MDEs ASTER selecionados. Esta comparação foi realizada também através da ferramenta denominada *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00, onde foram calculadas as diferenças entre a verdade terrestre em formato de MDEs e os dados dos MDEs ASTER em formato texto (listagem de coordenadas X, Y e Z).

4.2.3.3. MDE SRTM

Como o MDE SRTM é um produto pronto e não existe a intenção neste trabalho de alterar, ou modificar, seus dados, a metodologia de pesquisa aplicada a este dado foi bastante simples:

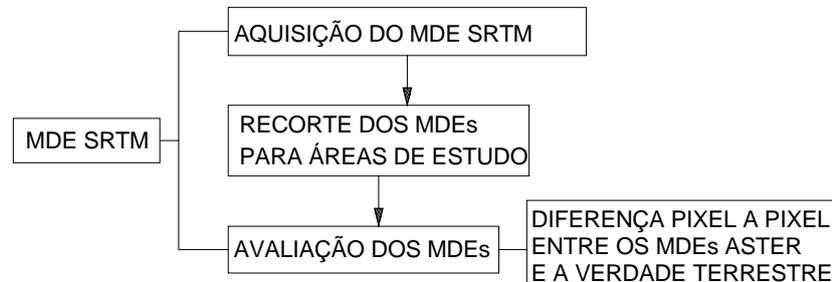


Fig. 12: Fluxograma MDE SRTM

Os dados SRTM adquiridos são da 1ª versão de processamento. O MDE apresenta resolução espacial de cerca de 90m e foi obtido para a mesma área da Carta Topográfica 1: 50.000 do município de Porto Alegre. Com isso, três recortes foram realizados para as áreas de estudo deste trabalho: plana, mista e acidentada.

Segundo RODRIGUEZ *et al* (2005) o erro linear absoluto para dos dados do SRTM deve ser menor que 16m em 90% dos dados. O conhecimento do erro a priori deste produto não é suficiente porque para a geração do MDE Híbrido é necessária a informação do erro de cada *pixel* dos modelos. Para isso uma nova análise foi realizada utilizando os MDEs da verdade terrestre através da ferramenta *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00, onde foram calculadas as diferenças entre os MDEs da verdade terrestre e os dados do SRTM em formato texto (listagem de coordenadas X, Y e Z).

4.2.4. Quarta Etapa: Geração do MDE Híbrido

Após a geração e avaliação dos MDEs a partir dos três tipos de dados (Cartas, ASTER e SRTM) pode-se iniciar a integração destes dados. Para tanto, os arquivos de cada MDE com o erro associado a cada *pixel* em formato texto foram selecionados e transformados em um único arquivo. O arquivo apresentou-se da seqüente forma: 1ª coluna a identificação ou número do ponto, 2ª coluna a Latitude do ponto, 3ª coluna a Longitude do ponto, 4ª coluna a Altitude do ponto, 5ª coluna o erro associado à Altitude do ponto. Assim, ao final dos dados do MDE ASTER, resolução espacial de 15m, inseriu-se os dados do MDE Cartas, resolução espacial de 30m, e logo após os dados do MDE SRTM, resolução 90m, construindo um único arquivo para cada área de estudo. A geração do MDE Híbrido foi realizada através do *software* GEOGRID que tem implementado o Método de Colocação por Mínimos Quadrados.

Como parâmetros de entrada neste programa foram utilizados a distância máxima para a interpolação igual a 30m e o número de pontos fechados por quadrante igual a 10 pontos. A resolução espacial adotada para o MDE Híbrido foi de 15m (melhor resolução existente entre os dados utilizados).

4.2.5. Quinta Etapa: Avaliação da qualidade do MDE Híbrido

Para avaliar a precisão dos MDEs Híbridos gerados foram utilizados os dados que compõem a verdade terrestre. As curvas de nível da verdade terrestre foram transformadas em dados pontuais, arquivos em formato texto. E assim, através da ferramenta *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00, calculou-se a diferença entre o valor de *Z* dos dados pontuais da verdade terrestre e o valor de *Z* interpolado no MDE Híbrido, para uma mesma posição *X,Y*. A resolução espacial dos MDEs Híbridos para as diferentes áreas é de 15m, isso equivale a uma área de 225m². Ao utilizar-se este tipo de análise, faz-se com que para um mesmo *pixel* sejam calculados diversos resíduos, tantos quantos existirem pontos coincidentes com a área de cada *pixel*.

5. RESULTADOS

Os MDEs gerados a partir dos diferentes dados (Cartas, ASTER e SRTM), resultados parciais deste trabalho, foram avaliados *pixel a pixel* através da comparação dos dados dos MDEs e os MDEs da verdade terrestre. Os resultados destas avaliações foram analisados estatisticamente, tabela 3, onde pode-se verificar que na Área Plana o dado que apresentou menor Erro Médio Quadrático foi o MDE SRTM igual a 3,404m, na Área Mista foi o MDE Cartas com 4,609m e na área Acidentada foi o MDE ASTER com o valor de 6,522m. Estes MDEs e os seus respectivos mapas dos erros (erros divididos em 10 intervalos iguais) são apresentados nas figuras 13, 14 e 15.

Tabela 3: Avaliação dos diferentes dados, SRTM, CARTAS e ASTER.

| Dados | | SRTM | CARTAS | ASTER |
|-----------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------|
| ÁREA PLANA | Número de <i>pixels</i> | 1400 | 9555 | 46000 |
| | Valor Mínimo (m) | -2,000 | -17,875 | -18,500 |
| | Valor Máximo (m) | 13,000 | 14,630 | 19,999 |
| | Média (m) | 2,728 | 0,703 | -2,287 |
| | Desvio Padrão (m) | 2,038 | 5,602 | 4,021 |
| | Erro Médio Quadrático(m) | 3,404 | 5,645 | 4,626 |
| | LE90(m) =1,6449 x EMQ | 5,600 | 9,286 | 7,609 |
| ÁREA MISTA | Número de <i>pixels</i> | 1400 | 9555 | 46000 |
| | Valor Mínimo (m) | -13,420 | -14,216 | -42,158 |
| | Valor Máximo (m) | 31,063 | 21,671 | 33,531 |
| | Média (m) | 6,794 | 1,530 | 2,146 |
| | Desvio Padrão (m) | 4,703 | 4,348 | 6,345 |
| | Erro Médio Quadrático(m) | 8,262 | 4,609 | 6,698 |
| | LE90(m) =1,6449 x EMQ | 13,590 | 7,582 | 11,018 |
| ÁREA ACIDENTADA | Número de <i>pixels</i> | 1400 | 9555 | 46000 |
| | Valor Mínimo (m) | -25,949 | -23,229 | -31,004 |
| | Valor Máximo (m) | 38,308 | 67,707 | 30,951 |
| | Média (m) | 6,321 | 12,188 | 3,349 |
| | Desvio Padrão (m) | 8,960 | 11,916 | 5,596 |
| | Erro Médio Quadrático(m) | 10,963 | 17,045 | 6,522 |
| | LE90(m) =1,6449 x EMQ | 18,032 | 28,037 | 10,728 |

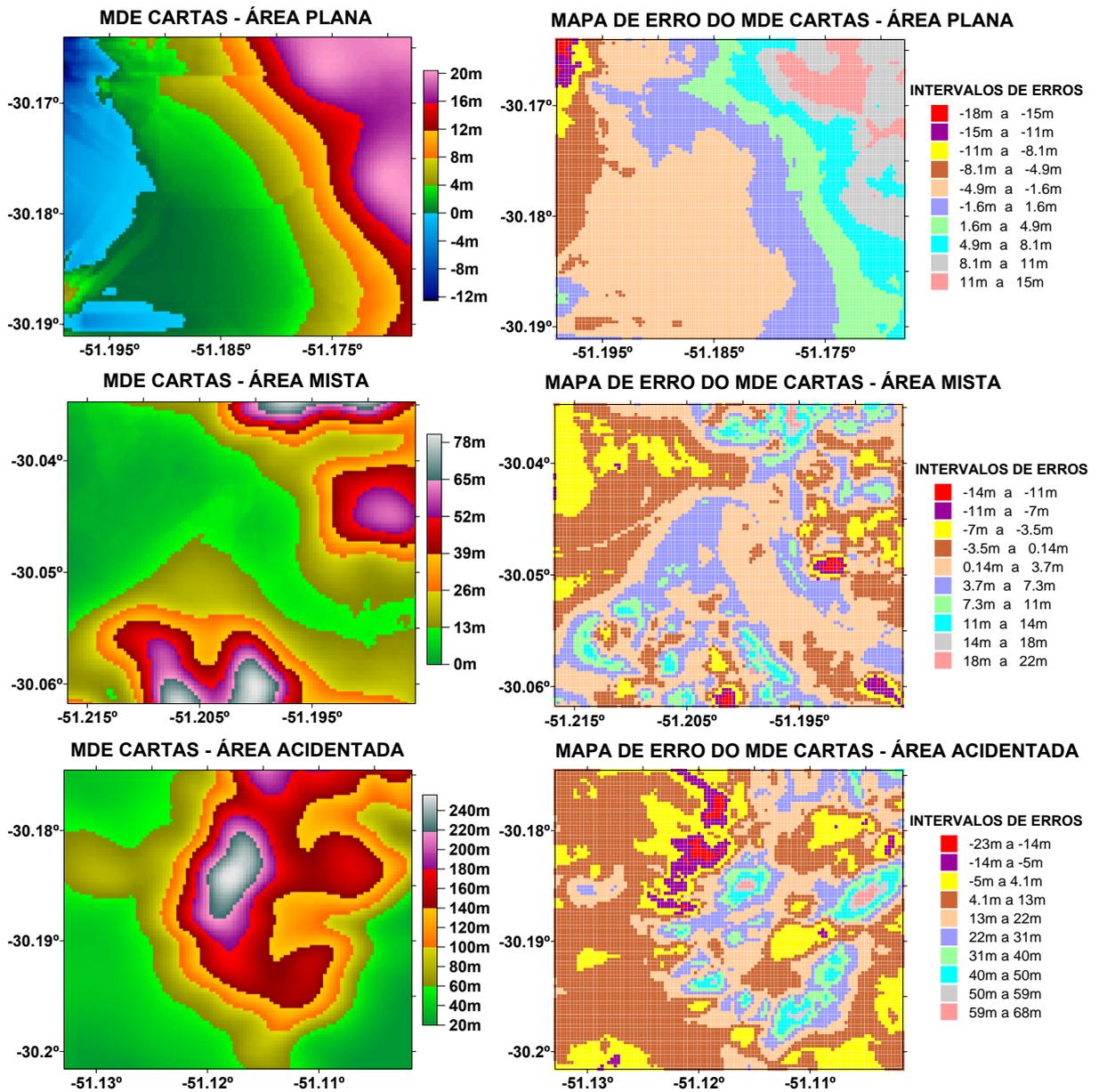


Fig. 13: MDE Cartas e Mapas de Erro para as três áreas de estudo.

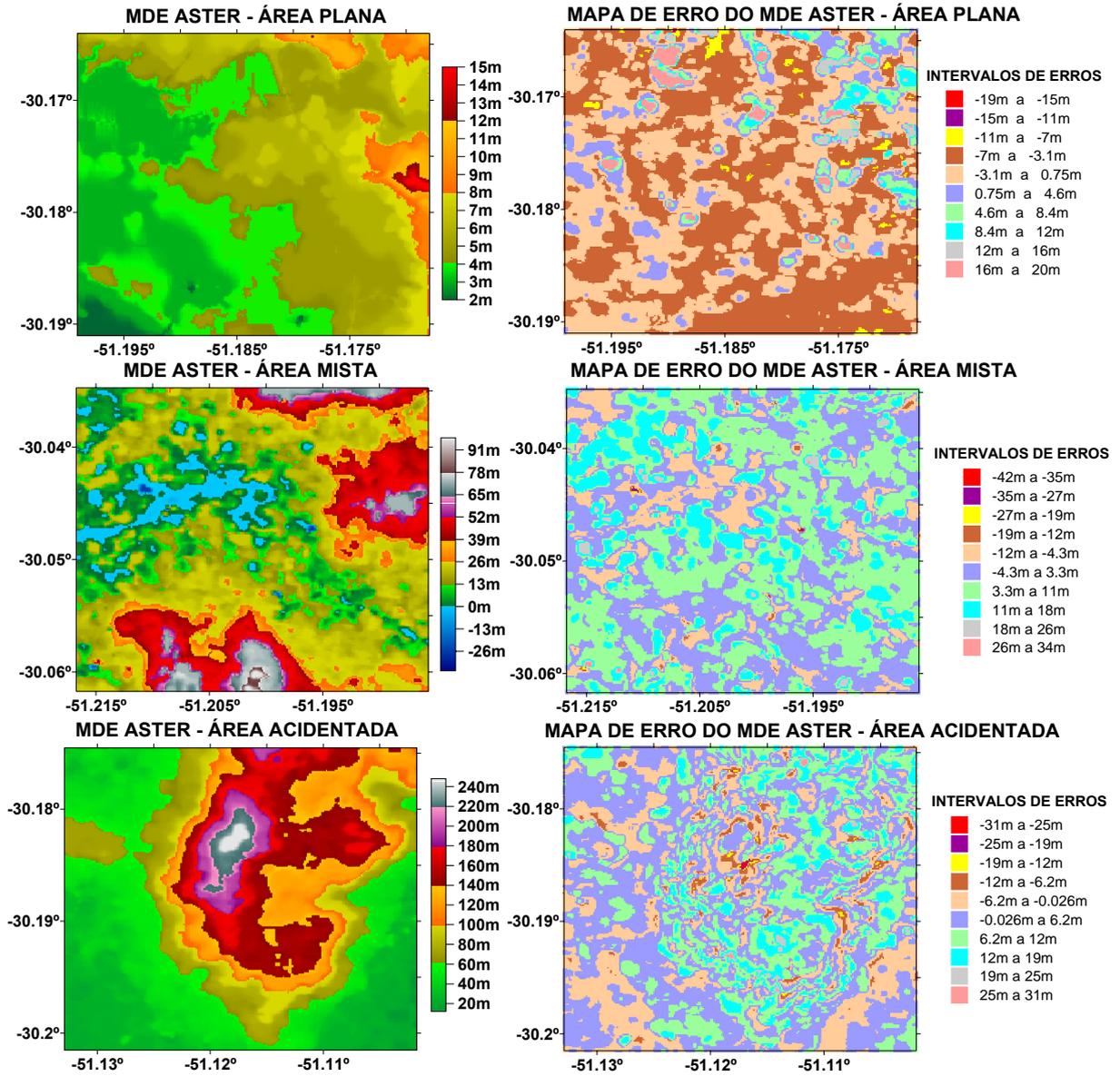


Fig. 14: MDE ASTER e Mapas de Erro para as três áreas de estudo.

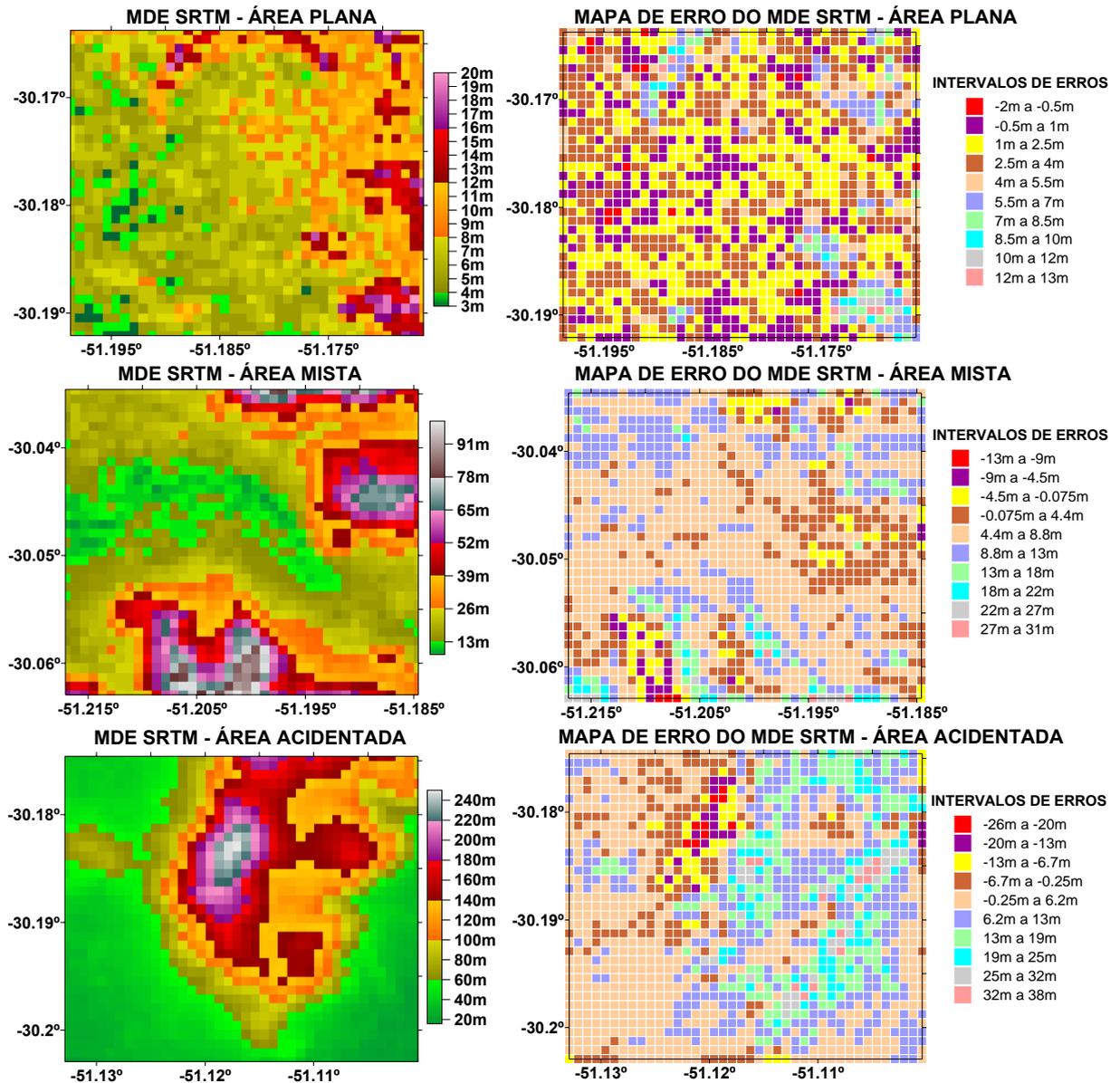


Fig. 15: MDE SRTM e Mapas de Erro para as três áreas de estudo.

Como resultado final pode-se visualizar através da figura 16 os MDEs Híbridos gerados para as diferentes áreas de estudo e respectivos mapas dos erros associados, onde os erros estão divididos em 10 intervalos iguais.

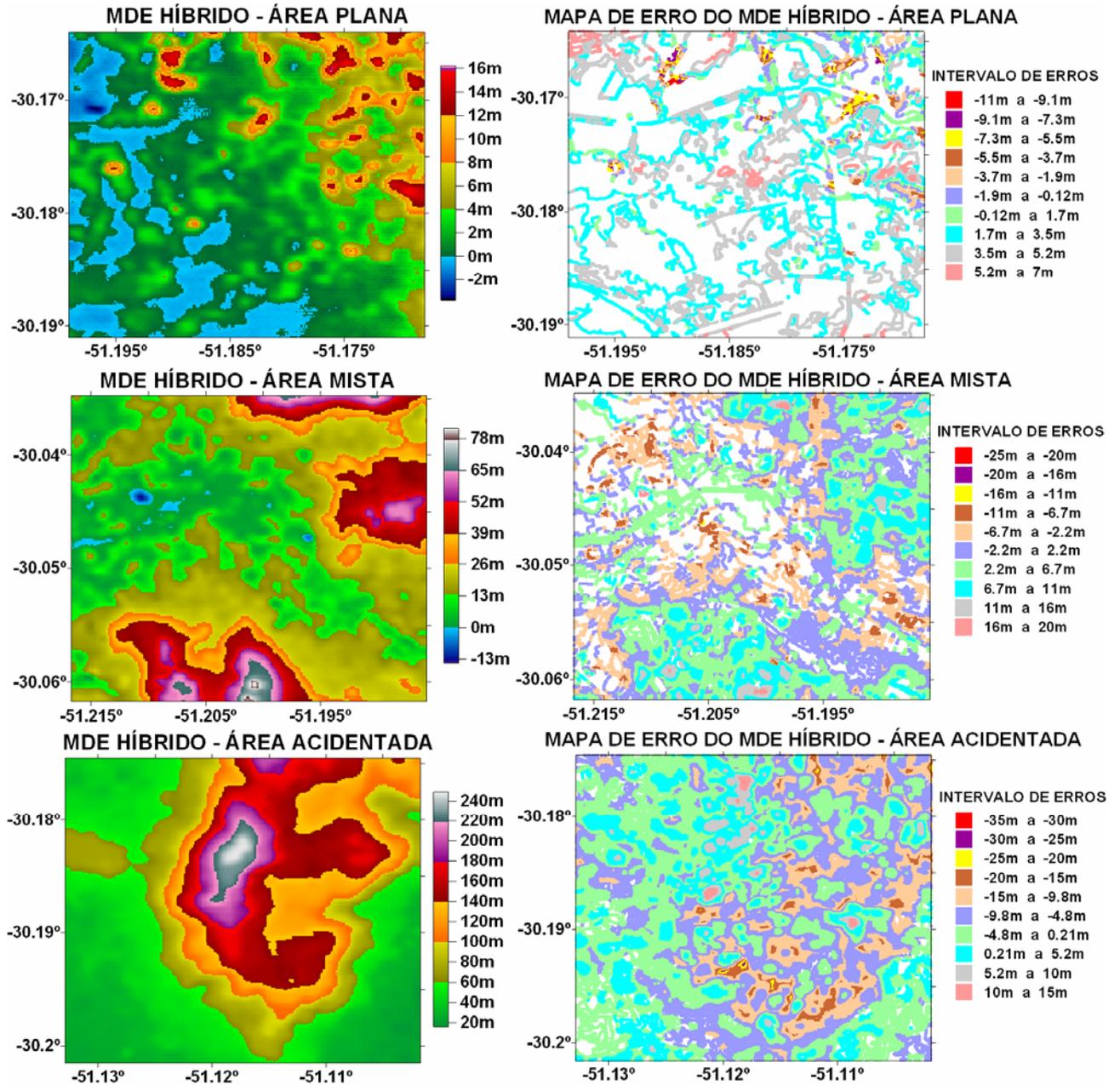


Fig. 16: MDEs Híbridos gerados para as diferentes áreas de estudo e respectivos mapas do erro associado.

Para a avaliação dos MDEs Híbridos foram determinadas as diferenças entre os valores de altimetria dos pontos da verdade terrestre e os interpolados no MDE Híbrido. Os resíduos positivos indicam que os pontos da verdade terrestre estão acima da superfície do MDE Híbrido e resíduos negativos indicam que os pontos estão abaixo da superfície do MDE Híbrido. Esta análise não foi uma avaliação *pixel a pixel* como a realizada com os MDEs Cartas, ASTER e SRTM. As precisões dos MDEs Híbridos para as diferentes áreas foram calculadas segundo a teoria de propagação de erros aleatórios utilizando a precisão da

Verdade Terrestre igual a 0,6775m e os Erros Médio Quadráticos avaliados para os MDEs Híbridos. A tabela 4 apresenta os resultados desta análise estatística.

Tabela 4: Avaliação dos resíduos obtidos por Verdade Terrestre menos MDE Híbrido.

| ÁREAS | PLANA | MISTA | ACIDENTADA |
|----------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Número de Pontos | 64993 | 312865 | 359416 |
| Valor Mínimo (m) | -10,846 | -24,528 | -34,955 |
| Valor Máximo (m) | 7,028 | 20,097 | 15,276 |
| Média (m) | 2,32 | 1,969 | -6,025 |
| Mediana (m) | 2,99 | 2,112 | -5,687 |
| Desvio Padrão (m) | 2,523 | 4,285 | 6,185 |
| Erro Médio Quadrático (m) | 3,427 | 4,715 | 8,634 |
| Precisão (m) | 3,493 | 4,763 | 8,66 |

Através do Mapa de Erro do MDE Híbrido gerado para a Área Plana pode-se verificar que a maioria dos resíduos estão dentro do intervalo de 1,7m a 5,2m. Sendo 40,1% dos pontos com erros dentro do intervalo de 1,7m a 3,5m (Fig. 17). Podendo-se constatar que grande parte da superfície interpolada está abaixo dos pontos da verdade terrestre. O MDE Híbrido Área Plana apresentou áreas com valores altimétricos abaixo de zero sendo o valor mínimo encontrado de -3,83m. Isto se deve em grande parte ao dado de entrada do MDE Cartas que apresenta áreas negativas com valor mínimo de -12,554m. A precisão estimada do MDE Híbrido da Área Plana foi de 3,493m, e LE90 (erro linear com 90% probabilístico) igual a 5,745m. Assim, 90% dos *pixels* do MDE Híbrido gerado para a Área Plana apresentam variação em altitude em relação à “altitude verdadeira” de 5,745m ou menos. Para uma visualização da contribuição dos diferentes dados no MDE Híbrido foi criada a figura 18, vistas perspectivas dos MDEs gerados.

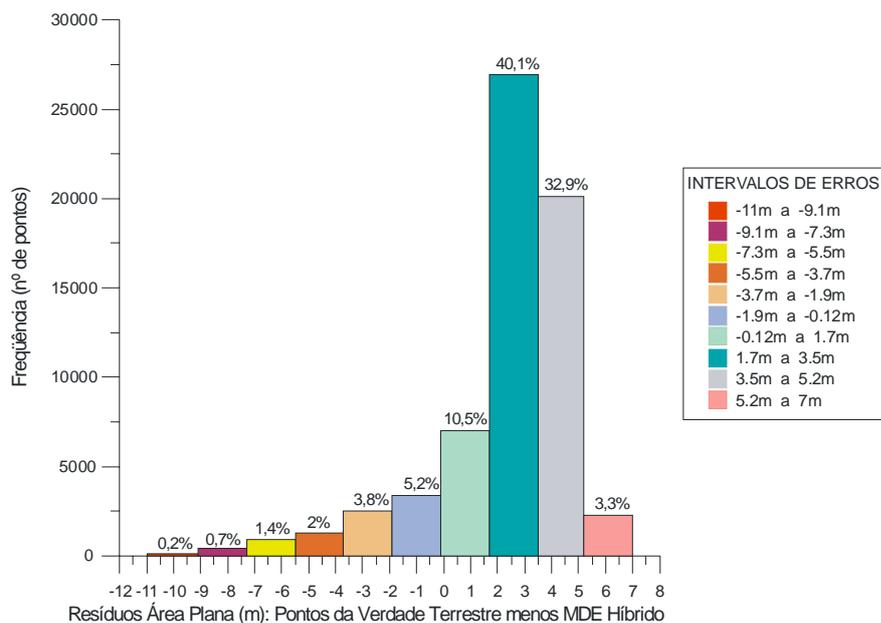


Fig. 17: Histograma da diferença entre a Verdade Terrestre e o MDE Híbrido – Área Plana.

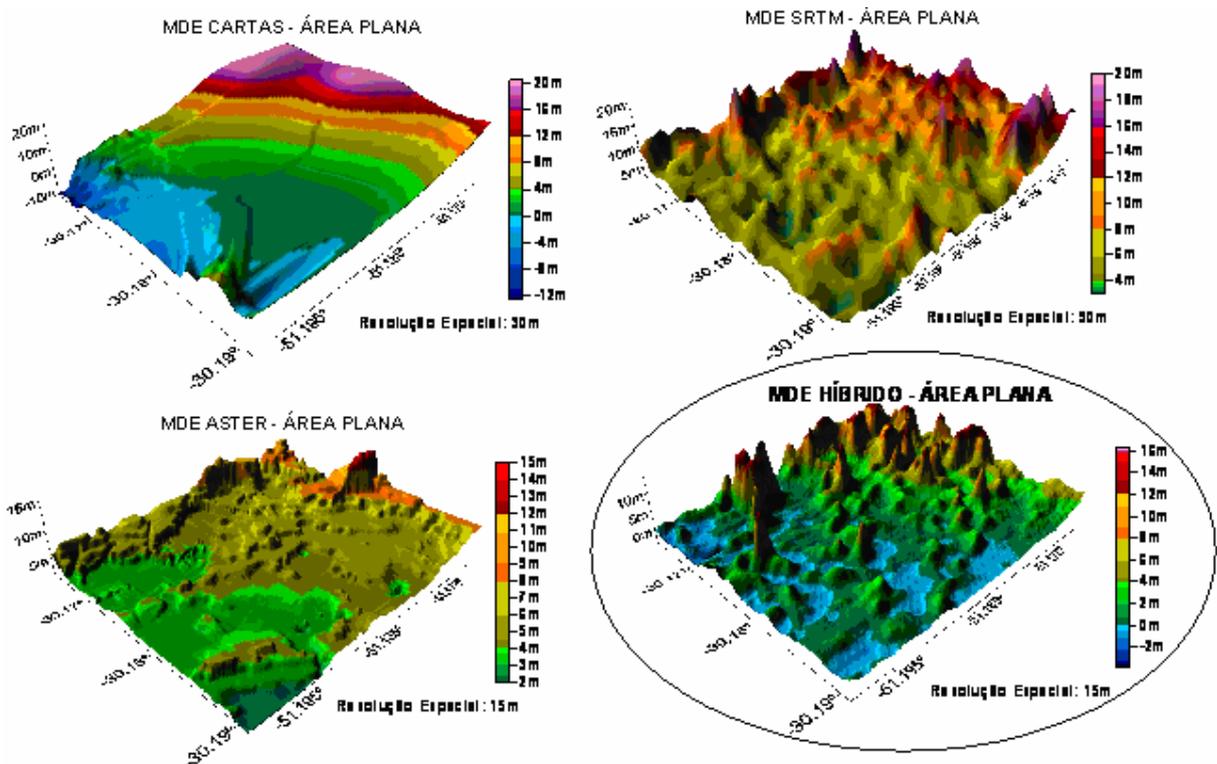


Fig. 18: Vista perspectiva dos MDEs gerados para a Área Plana.

No MDE Híbrido gerado para a Área Mista as análises realizadas mostram que a maioria dos pontos apresenta erros dentro do intervalo de -2,2m a 6,7m. Sendo 34,6% dos pontos com erros dentro do intervalo de 2,2m a 6,7m (Fig. 19). Este MDE apresentou áreas com valores altimétricos abaixo de zero sendo o valor mínimo encontrado de -14,55m. Isto se deve em grande parte ao dado de entrada do MDE ASTER que apresenta áreas negativas com valor mínimo de -37,21m. A precisão estimada do MDE Híbrido da Área Mista foi de 4,763m, e o LE90 Área Mista igual a 7,835m. Assim, 90% dos *pixels* do MDE Híbrido gerado para a Área Mista apresentam variação em altitude em relação à “altitude verdadeira” de 7,835m ou menos. Para uma visualização da contribuição dos diferentes dados no MDE Híbrido para a Área Mista deve-se observar a figura 20, onde são encontradas as vistas perspectivas dos MDEs gerados.

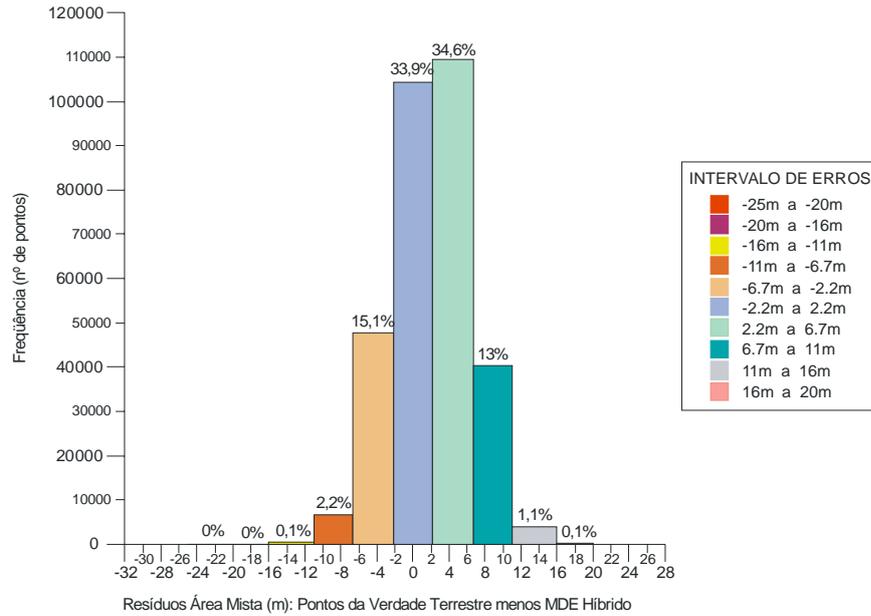


Fig. 19: Histograma da diferença entre a Verdade Terrestre e o MDE Híbrido – Área Mista.

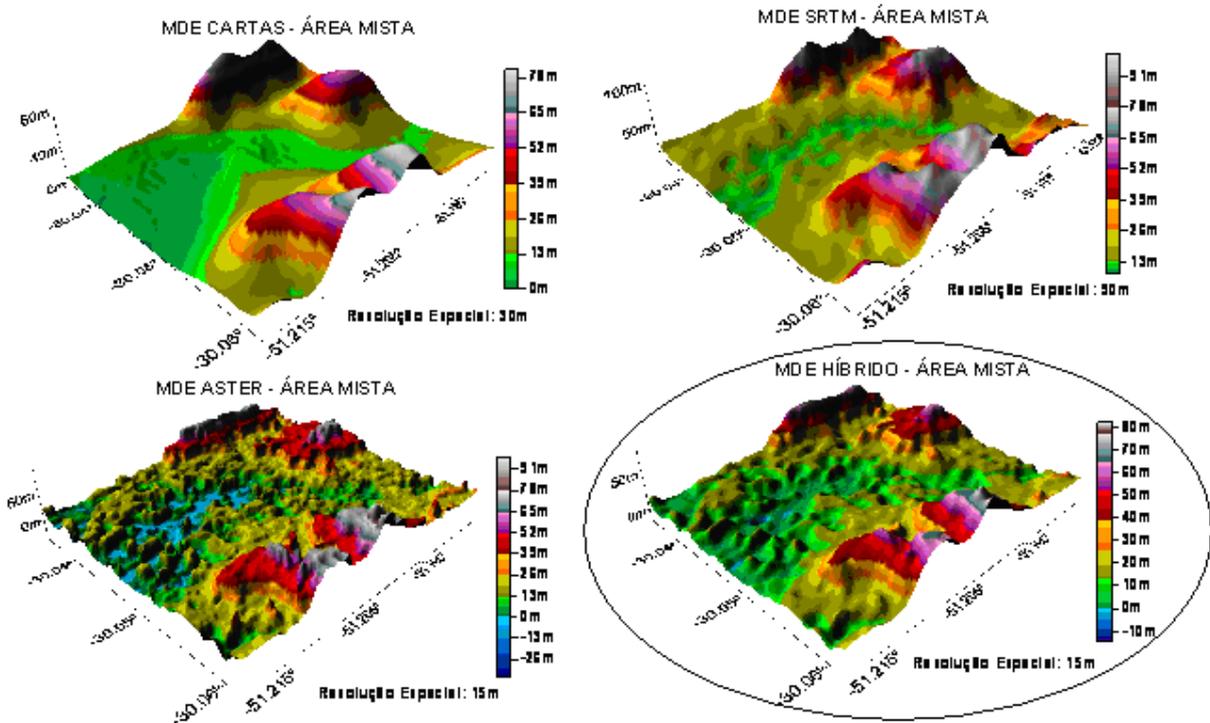


Fig. 20: Vista perspectiva dos MDEs gerados para a Área Mista.

O MDE Híbrido gerado para a Área Acidentada apresentou a maioria dos erros dentro do intervalo de -15m a 0,21m. Sendo 29,8% dos pontos com erros dentro do intervalo de -4,8m a 0,21m (Fig. 21). Isto demonstra que grande parte da superfície interpolada está acima dos pontos da verdade terrestre. O MDE Híbrido não apresentou áreas com valores altimétricos abaixo de zero. A precisão estimada do MDE Híbrido da Área Acidentada foi de 8,660m e o LE90 Área Acidentada igual a 14,245m. Assim, 90% dos *pixels* do MDE Híbrido

gerado para a Área Acidentada apresentam variação em altitude em relação à “altitude verdadeira” de 14,245m ou menos. Para uma visualização da contribuição dos diferentes dados no MDE Híbrido para a Área Acidentada deve-se observar a figura 12, vista perspectiva dos MDEs gerados.

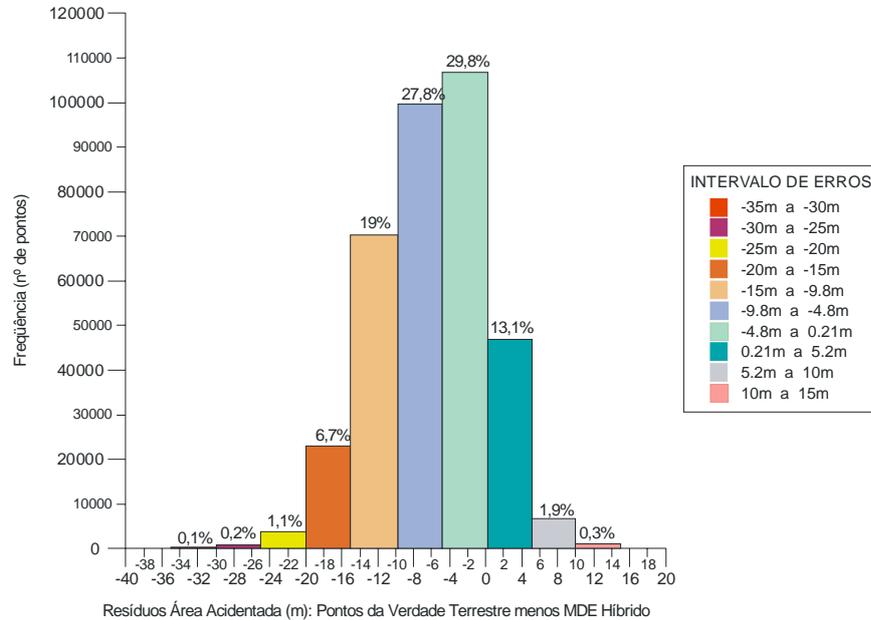


Fig. 21: Histograma da diferença entre a Verdade Terrestre e o MDE Híbrido – Área Acidentada.

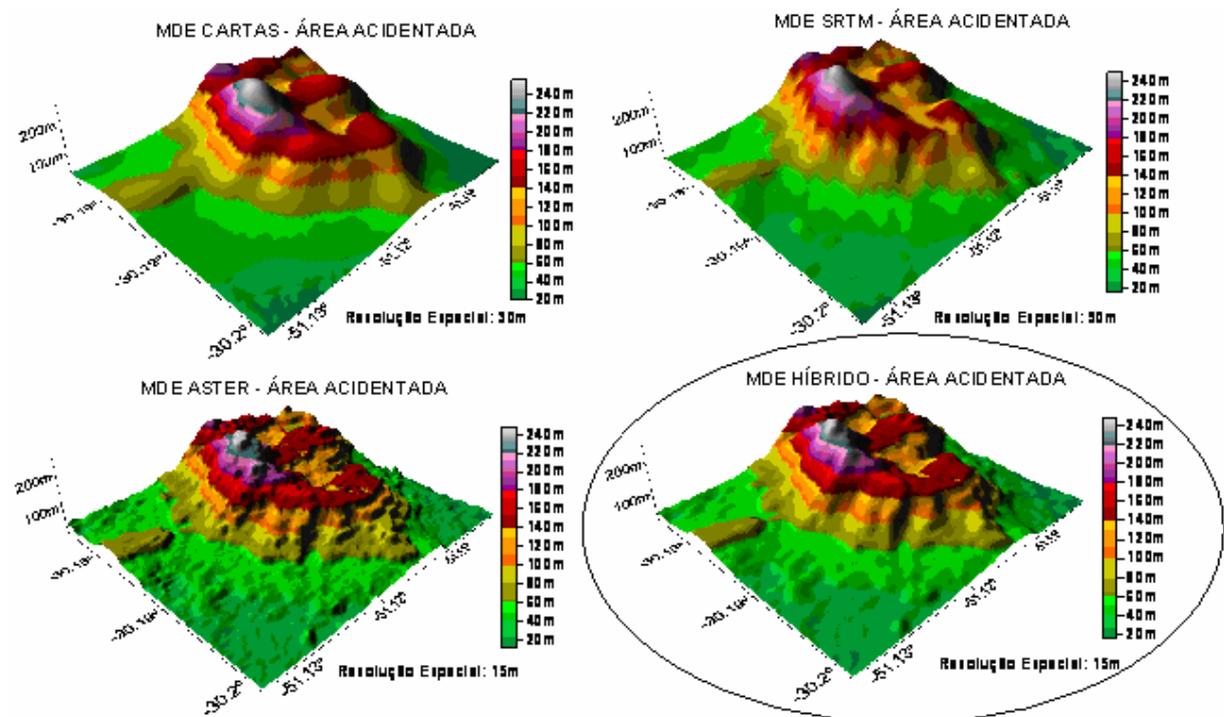


Fig. 22: Vista perspectiva dos MDEs gerados para a Área Acidentada.

6. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram apresentados os experimentos realizados para a obtenção e avaliação de um novo Modelo Digital de Elevação, através do método da colocação por mínimos quadrados e determinado a partir da integração de dados altimétricos obtidos de diferentes técnicas: aerofotogrametria (curvas de nível extraídas de carta 1:50.000), estereoscopia em imagens de um sensor orbital (ASTER) e interferometria de radar com abertura sintética (SRTM), O novo modelo foi denominado de MDE Híbrido, sendo que a sua avaliação levou as seguintes conclusões:

1 – Para os MDEs gerados a partir de curvas de nível extraídas de carta topográfica na escala 1:50.000, é recomendada a utilização do modelo matemático de Colocação por Mínimos Quadrados. No entanto, foram detectados alguns problemas no processo de interpolação. Por exemplo, valores altimétricos negativos na Área Plana isto é devido em grande parte à pequena amostragem; nas cartas a equidistância das curvas de nível é de 20 em 20 metros e esta região apresenta pequena variação altimétrica. A região interpolada para o MDE Cartas é a área que compreende o município de Porto Alegre, mas a avaliação ficou restrita aos recortes realizados para as áreas de estudo.

2 – O MDE ASTER foi gerado com sucesso, sendo o modelo que obteve menor Erro Médio Quadrático em Área Acidentada (6,522m). Isto se deve, em grande parte, à ausência de nuvens nas imagens ASTER, permitindo uma avaliação isenta da remoção de pontos de controle, o que afetaria a qualidade dos resultados obtidos.

3 – O MDE SRTM, com resolução espacial igual 90m, foi o dado que apresentou menor Erro Médio Quadrático, 3,404m, na Área Plana. O erro linear absoluto para os dados do MDE SRTM segundo RODRIGUEZ *et al* (2005) deve ser menor que 16m em 90% dos dados, ou seja, LE90 igual a 16m. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram valores de LE90, erro linear com 90% probabilístico, iguais a 5,600m na Área Plana, 13,590m na Área Mista e de 18,032m na Área Acidentada. Isto demonstra que os dados SRTM nas áreas Plana

e Mista encontram-se dentro da precisão determinada para este produto. Já na Área Acidentada o valor de LE90 acima de 16m mostra que os dados SRTM têm um comportamento ruim em áreas com grande variação de altimetria.

4 - O MDE Híbrido da Área Plana apresentou-se suavizado, ou seja, a superfície interpolada estava abaixo dos pontos da verdade terrestre em contraponto o MDE Híbrido da Área Acidentada apresentou-se acima dos pontos da verdade terrestre. Isto demonstra que a variância altimétrica tem grande influência no erro do MDE gerado.

5 - O MDE Híbrido gerado para a Área Plana apresentou uma acurácia altimétrica igual a 3,493m o que atende aos requisitos da Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfico na escala 1:25.000. Para a Área Mista foi determinado o valor de 4,763m o que também atende aos requisitos da Classe A do PEC na escala 1:25.000. Já na Área Acidentada o valor encontrado foi de 8,66m atendendo os requisitos da Classe A do PEC na escala 1:50.000.

6 - A utilização do método de Colocação por Mínimos Quadrados na integração de diferentes dados altimétricos se mostrou satisfatória. Por ser um método até então utilizado na modelagem do geóide, interpolando dados gravimétricos. Abre-se aqui a possibilidade da utilização da técnica para outros fins que não estes. A criação de uma ferramenta com este método implementado para um *software* de SIG ou de Processamento de Imagens poderá facilitar o acesso a diferentes usuários. Uma questão a ser melhorada é possibilitar a escolha da função covariância de acordo com os dados a serem interpolados.

7 - Os resultados práticos obtidos nesta pesquisa mostram que os dados altimétricos com diferentes resoluções espaciais podem ser integrados, desde que se tenha conhecimento das suas precisões. A resolução espacial de um determinado dado não está relacionada com a sua precisão. A técnica de extração da altimetria é que determina em grande parte a precisão que este dado poderá ter.

8 - O problema da escolha da melhor forma de aquisição de dados altimétricos é assunto complexo e o presente trabalho comprovou que esta questão pode ser amenizada ao gerar-se um MDE Híbrido, pois este modelo tende a seguir os valores altimétricos com menor erro em cada região distinta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, Michael; HOOK, Simon. 2002. **ASTER User Handbook** - Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Ver. 2. Disponível em: <asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf> Acesso em 5/06/2007.

BRASIL; **Decreto Lei 89.817 – Padrão de Exatidão Cartográfica**. 1984.

BRITO, Jorge; COELHO, Luiz. 2002. **Fotogrametria Digital**. Instituto Militar de Engenharia. 1ª Ed. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://e-foto.sourceforge.net/ebook-p.html>> Acesso em 3/11/2004.

BURROUGH, Peter A. 1998. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University,

CENTENO, Jorge A. S.; Filho, Carlos A. Z.; 2004 Análise da qualidade de informações altimétricas geradas pelo sistema ASTER. In: **CD Anais do I SIMGEO – I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação**, Recife.

DRUZINA, Aline G. S. 2004. **Análise de modelos digitais de elevação gerados a partir de cartas digitalizadas e imagens ASTER**. Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ENVI - Environment for Visualizing Images. 2006. **Guia do ENVI em Português**. Research Systems Inc. & Sulsoft - Disponível em: <<http://www.envi.com.br>>. Acesso em: 24 de setembro 2007.

FARR, T. G., et al. 2007. **The Shuttle Radar Topography Mission**. Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf>. Acesso em: 28 de setembro 2007.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto. Modelagem numérica de terreno. 2004 In: **Introdução a Ciência da Geoinformação**. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2004.

FILHO, Carlos Roberto S. 2003. **ASTER à vista**. InfoGeo, Curitiba, ano 5, n. 29.

GEMAEL, Camil. 1994. **Introdução ao Ajustamento de Observações – Aplicações Geodésicas**. Curitiba. Editora da UFPR, 319 p.

GOLDANI, Daniel; GENRO, Rafael; SALOMONI, Rodrigo. 2002. **Determinação de um modelo geoidal local para o município de Porto Alegre**. Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HUTCHINSON, M. F.; GALLANT, J. C. 1999. 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

ITAME, O.Y. 2001. **Controle de Qualidade Aplicado na Modelagem Digital de Terreno**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 105 p.

LEY, R.1986. **Accuracy assessment of digital terrain models**. Auto-Carto London, 1:455-464

LEMOS, M. C.; Souza, S.F.; Rocha R. S. 2004. Avaliação da qualidade dos dados altimétricos derivado do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). In: **Anais do I SIMGEO – I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação**, Recife 1-3 de setembro.

LI, Zhilin; ZHU, Qing; GOLD, Christopher. 2005. **Digital Terrain Modeling – Principles and Methodology**. CRC Press.

MILLER, C; LAFLAMME, R. 1958. The digital terrain model – theory and applications, **Photogrammetric Engineering**, 24: 433-442.

MOREIRA, Maurício A. 2001. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. São José dos Campos – SP – INPE, 250pp.

MORITZ, Helmut.1970. **Least-squares estimation in Physical Geodesy**. Pub. Deut. Geod. Komm. A. 69.

MORITZ, Helmut.1972. **Advanced least squares methods**. Dep. of Geodetic Science, O.S.U., Report. n. 175.

MORITZ, Helmut. 1980. **Advanced Physical Geodesy**. West Germany: Herbert Wichmann Verlag, 500pp.

MURA, J. C. 2000. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR**. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos,. Disponível em:<<http://iris.sid.inpe.br:1905/col/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24/doc/pdf/>>

NASA - National Aeronautics and Space Administration.2005. **SRTM**, Disponível em <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>>. Acesso em 29 de agosto de 2005

NIEVINSKI, Felipe G. 2004. **Interferometria por radar de abertura sintética (InSAR)** Monografia (Graduação) . Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 87p. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/download/relatorio-insar-felipe.pdf>>.

NOGUEIRA JUNIOR, João Bosco. 2003. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. Dissertação (Mestrado - Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. UNESP, Presidente Prudente.

PARADELLA, Waldir R.; CECARELLI, Izabel C. F.; LUIZ, Silvia; DE OLIVEIRA, Cleber G.; OKIDA, Rosana. 2005. Geração de carta topográfica com estéreo-pares fine do

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.

PROCEMPA, 2006 - **Mapa Digital Oficial de Porto Alegre** - Disponível em: <http://geo.procempa.com.br/geo/#> Acesso em: 01 de maio de 2006.

KAULA, W. M. 1959. **Statistical and harmonic analysis of gravity**. J. Geophys. Research, v.64, n.12.

KRARUP, T. 1969. **A contribution to the mathematical foundation of Physical Geodesy**. Copenhagen: Danish Geodetic Institute, Publ. n. 44.

RICHARDS, John A.; JIA, Xiuping. 1999. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**, 3º ed. Berlim: Springer-Verlag, 359 p.

ROCHA, Ronaldo S. 2002. **Exatidão cartográfica para as cartas digitais urbanas**. 128f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RODRIGUEZ, E.; MORIS, C.S.; BELZ, J.E.; CHAPIN, E.C.; MARTIN, J.M.; DAFFER, W.; HENSLEY, S. 2005. **An assessment of the SRTM topographic products**. Relatório Técnico JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 p.

SALOMONI, C.S. 2005. **Determinação de Parâmetros de Transformação entre os data Carta Geral (CG) e South American Datum 1969 (SAD69) para a Região de Porto Alegre/RS**. Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SANTOS, Cláudio J. B. dos. 2001. **Avaliação da qualidade de Modelos Digitais de Terreno construídos a partir de diferentes fontes de dados**. Dissertação (Mestrado em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais – Produção e Análise da Informação Geográfica) – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, IBGE, Rio de Janeiro.

SMT – Secretaria Municipal de Turismo. Prefeitura de Porto Alegre. 2007. **A Cidade**. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/turismo/default.php?p_secao=3>. Acesso em: 25 de outubro de 2007.

STEINMAYER, Michael. 2003. Extração de Modelos Digitais de Terreno com o sensor ASTER. **InfoGeo**, Curitiba, ano 5, n. 30, Paineis Tecnológico, pg 38 – 39.

TOUTIN, T & Gray, L. 2000. **State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data**. Canada Centre for Remote Sensing (CCRS).

TSU, Hiroji.. 1996. **Algorithm theoretical basis document for ASTER level – 1 data processing**. Japan: Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), Ver. 3.0. Disponível em: <<http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/documnts/pdf/1a1b.pdf>> Acesso em: 14 dez. 2004.

USGS - United States Geological Survey. 2005. **SRTM**. Disponível em <<http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso em 7 de agosto de 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Exemplo de aplicação do Método de Colocação por Mínimos Quadrados

Considerando que foram realizadas quatro observações distribuídas de acordo com a Fig. 4, determinar a elevação e o resíduo associado ao ponto a :

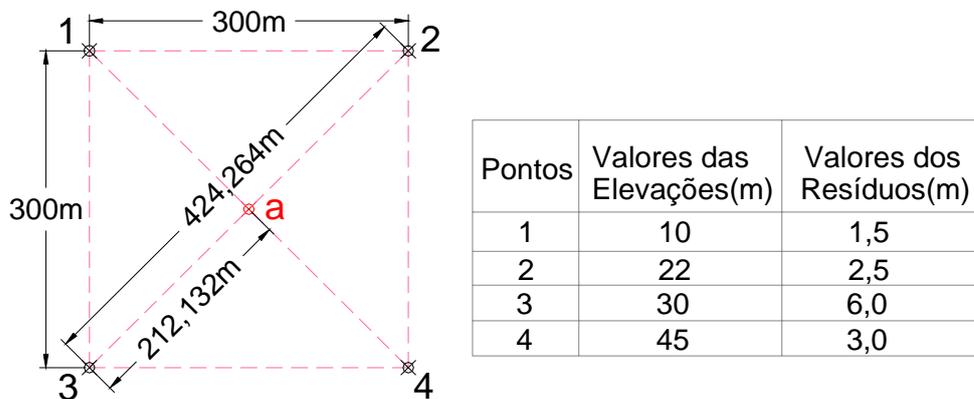


Fig. 45 – Exemplo de aplicação do Método de Colocação por Mínimos Quadrados considerando covariâncias planas.

Fórmula básica:

$$x = AX + s + n$$

Nesse exemplo como todos os pontos observados estão a uma mesma distância do ponto a , a ser calculado, a componente sistemática AX nesse exemplo é igual a zero.

Passamos ao cálculo do sinal nos pontos:

$$s^2 = C_{s'x} \bar{C}^{-1} (x - AX)$$

$$AX = 0$$

$$s^2 = C_{s'x} \bar{C}^{-1} x$$

$$s^2 = C_{s'x} C_{xx}^{-1} x$$

a) Cálculo das matrizes:

1) Matriz variância-covariância das observações:

$$C_{xx} = \bar{C} = C + D = C_{nn} + C_{ss}$$

onde C_{nn} = matriz variância-covariância do ruído; C_{ss} = matriz variância-covariância do sinal nos pontos de observação.

Considerando a existência do sinal, começamos por calcular a sua matriz covariância C_{ss} nos pontos de cálculo. Para tanto utilizaremos uma função covariância

$$C_{ss} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix}$$

$$C_{11} = C_0 e^{-a^2 d_{11}^2} = 600 \times e^{-0,0028^2 \times 0^2} = 600$$

$$C_{12} = C_0 e^{-a^2 d_{12}^2} = 600 \times e^{-0,0028^2 \times 300^2} = 300$$

$$C_{13} = C_0 e^{-a^2 d_{13}^2} = 600 \times e^{-0,0028^2 \times 300^2} = 300$$

$$C_{14} = C_0 e^{-a^2 d_{14}^2} = 600 \times e^{-0,0028^2 \times 424,264^2} = 150$$

Seguindo da mesma forma para o cálculo dos outros componentes da matriz obtemos o seguinte resultado:

$$C_{ss} = \begin{bmatrix} 600 & 300 & 300 & 150 \\ 300 & 600 & 150 & 300 \\ 300 & 150 & 600 & 300 \\ 150 & 300 & 300 & 600 \end{bmatrix}$$

Agora montamos a matriz variância-covariância do ruído C_{nn} (resíduos):

$$C_{nn} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_3^2 & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_4^2 \end{bmatrix}$$

Como as observações (vetor x) são independentes entre si as covariâncias serão nulas e C_{nn} será uma matriz diagonal:

$$C_{nn} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,5^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,5^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}$$

Assim a matriz variância-covariância das observações será facilmente calculada por:

$$C_{xx} = C_{nn} + C_{ss} = \begin{bmatrix} 2,25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 600 & 300 & 300 & 150 \\ 300 & 600 & 150 & 300 \\ 300 & 150 & 600 & 300 \\ 150 & 300 & 300 & 600 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 602,25 & 300 & 300 & 150 \\ 300 & 606,25 & 150 & 300 \\ 300 & 150 & 636 & 300 \\ 150 & 300 & 300 & 609 \end{bmatrix}$$

2) Matriz covariância cruzada:

$$C_{s'x} = \text{cov}(s', s) = \Sigma_{s's}$$

Também será obtida fazendo-se uso da função covariância adotada neste exemplo assim:

$$C_{s'x} = [C_{a1} \quad C_{a2} \quad C_{a3} \quad C_{a4}]$$

$$C_{a1} = C_0 e^{-a^2 d_{a1}^2} = 600 \times e^{-0,0028^2 \times 212,132^2} = 424,26$$

como todos os pontos estão a mesma distância de a a matriz covariância cruzada será igual a

$$C_{s'x} = [424,26 \quad 424,26 \quad 424,26 \quad 424,26]$$

b) Cálculo do sinal nos pontos: Com as matrizes definidas podemos passar ao cálculo do sinal através da seguinte fórmula:

$$s' = C_{s'x} C_{xx}^{-1} x$$

$$(s')_{1 \times 1} = (C_{s'x})_{1 \times 4} (C_{xx}^{-1})_{4 \times 4} (x)_{4 \times 1}$$

$$s' = [424,26 \quad 424,26 \quad 424,26 \quad 424,26] \times \begin{bmatrix} 602,25 & 300 & 300 & 150 \\ 300 & 606,25 & 150 & 300 \\ 300 & 150 & 636 & 300 \\ 150 & 300 & 300 & 609 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 10 \\ 22 \\ 30 \\ 45 \end{bmatrix}$$

$$s' = 33,195$$

c) Interpolação:

$$t = \bar{A}X + s'$$

Como $AX = 0$ o valor interpolado é igual ao sinal.

$$t_a = s' = 33,195m = \text{elevação do ponto } a$$

O valor da elevação para o ponto a é de 33,195

d) Estimativa do erro:

$$C_{ss} = C_0 e^{-a^2 d_{aa}^2} = 600 \times e^{-0,0028^2 \times 0^2} = 600$$

$$E_{ss} = C_{ss} - C_{s'x} (C_{xx})^{-1} (C_{s'x})^T$$

$$E_{ss} = 600 - [424,26 \quad 424,26 \quad 424,26 \quad 424,26] \times \begin{bmatrix} 602,25 & 300 & 300 & 150 \\ 300 & 606,25 & 150 & 300 \\ 300 & 150 & 636 & 300 \\ 150 & 300 & 300 & 609 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 424,26 \\ 424,26 \\ 424,26 \\ 424,26 \end{bmatrix}$$

$$E_{s's'} = \sigma_{s's'}^2 = 71,678m^2 \rightarrow \sigma_{s's'} = \sigma_a = 8,466m = \text{resíduo ponto } a$$

ANEXOS

ANEXO A – Listagem de Coordenadas dos Pontos de Controle

| Nome do Ponto = RN's | Latitude*(decimal) | Longitude*(decimal) | Altitude Ortométrica (m) | Precisão da Altitude Ortométrica(cm) |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|---|
| RN001 | -30,0819015232 | -51,2119110631 | 48,928 | 1,309 |
| RN005 | -30,1336771591 | -51,2312786058 | 5,256 | 1,302 |
| RN007 | -30,0871200378 | -51,1879056598 | 107,572 | 1,305 |
| RN011 | -30,1221870429 | -51,1754798553 | 102,627 | 1,322 |
| RN013 | -30,1508232681 | -51,1771890811 | 21,479 | 1,293 |
| RN025 | -30,2139930902 | -51,0364812031 | 26,299 | 1,537 |
| RN029 | -30,1577607987 | -51,2194233747 | 13,753 | 1,668 |
| RN033 | -30,1835525861 | -51,1397065368 | 22,701 | 1,258 |
| RN037 | -30,1036360808 | -51,1388057001 | 130,473 | 1,326 |
| RN038_2 | -30,1104917698 | -51,1554005468 | 62,257 | 1,314 |
| RN039 (S.C.) | -30,1544219117 | -51,1381435206 | 36,456 | 1,274 |
| RN040 | -30,1426683657 | -51,1274779139 | 35,217 | 1,302 |
| RN043 | -30,1198648024 | -51,1577230003 | 36,713 | 1,261 |
| RN050 | -30,1344778103 | -51,0955479314 | 110,002 | 1,258 |
| RN054 | -29,9850821135 | -51,1575855618 | 2,296 | 1,356 |
| RN055 | -29,9804248579 | -51,1146422412 | 3,897 | 1,309 |
| RN057_2 | -30,1121445104 | -51,1098860286 | 84,630 | 1,281 |
| RN059 | -30,0707504242 | -51,1411085081 | 37,371 | 1,316 |
| RN061 | -29,9907518241 | -51,0962142123 | 9,564 | 1,421 |
| RN062 | -30,0158958413 | -51,1068553229 | 42,681 | 1,352 |
| RN074 | -30,1007331826 | -51,2273744231 | 16,889 | 1,661 |
| RN076 | -30,0795190927 | -51,2471415646 | 5,418 | 1,285 |
| RN078 | -30,1111726088 | -51,2278566837 | 21,828 | 1,339 |
| RN082 | -30,1859027519 | -51,1751528875 | 5,387 | 3,587 |
| RN083 | -30,1821525465 | -51,2092306923 | 4,621 | 1,801 |
| RN086 | -30,0805851973 | -51,2204097316 | 115,798 | 1,502 |
| RN087 | -30,0889303238 | -51,2470355873 | 3,702 | 1,67 |
| RN092 (S.C.) | -30,1890385839 | -51,1593747768 | 12,388 | 2,121 |
| RN102 | -30,1639014329 | -51,0800666781 | 41,978 | 1,522 |
| RN113 | -30,2107809293 | -51,0916289350 | 19,700 | 4,061 |
| RN119 | -30,2250836197 | -51,0743484030 | 9,662 | 1,52 |
| RN124 | -30,2331253565 | -51,1349718185 | 6,085 | 4,447 |
| RN127 | -30,0377342378 | -51,2259146339 | 5,194 | 1,334 |
| RN146 (S.C.) | -29,9914861612 | -51,1845416907 | 2,926 | 1,35 |
| RN156 | -30,0135419672 | -51,1648712481 | 14,310 | 1,341 |
| RN201 | -30,0414344660 | -51,1322187483 | 63,568 | 1,271 |
| RN222 | -30,1120598955 | -51,2397591192 | 46,856 | 1,305 |
| RN234 | -30,0408629133 | -51,1589259201 | 84,477 | 1,276 |
| RN242 | -29,9898579671 | -51,1252641212 | 4,181 | 1,356 |
| RN252 | -30,1251052453 | -51,1692346913 | 78,867 | 1,511 |

| | | | | |
|---------------------|----------------|----------------|---------|-------|
| RN255 (S.C.) | -30,1199741700 | -51,1967538046 | 80,627 | 1,329 |
| RN258 | -30,0823887725 | -51,2317066446 | 17,667 | 1,437 |
| RN259 | -30,0247192891 | -51,2006636850 | 29,082 | 1,344 |
| RN262 | -30,0409908029 | -51,1080957868 | 85,590 | 1,289 |
| RN271 (S.C.) | -30,1158604294 | -51,1698462542 | 69,562 | 1,81 |
| RN274 | -30,0872776881 | -51,2342737159 | 21,347 | 1,566 |
| RN284 | -30,0358014053 | -51,1856757636 | 33,807 | 1,29 |
| RN301 | -30,0884775868 | -51,1321445979 | 105,375 | 1,357 |
| RN304 | -30,2135535890 | -51,1282366422 | 12,915 | 1,305 |
| RN305 | -30,2131813709 | -51,1574642001 | 4,233 | 4,38 |
| RN306 | -30,0590060395 | -51,2081378782 | 61,980 | 1,49 |
| RN308 | -30,1062973847 | -51,1726325444 | 172,864 | 1,347 |
| RN309 (S.C.) | -30,1682706922 | -51,1536261611 | 15,080 | 2,025 |
| RN311 | -30,0619727875 | -51,1645307774 | 33,205 | 1,321 |
| RN312 | -30,0626401483 | -51,1851123858 | 20,806 | 1,329 |
| RN314 | -30,1068207757 | -51,2223661968 | 42,793 | 1,357 |
| RN315 | -30,1377686430 | -51,1950998801 | 75,382 | 1,36 |
| RN320 | -30,0593715151 | -51,2303686623 | 2,170 | 1,302 |
| RN331 | -30,0052397490 | -51,1381570308 | 13,047 | 1,437 |
| RN332 | -30,0056913917 | -51,1868652326 | 3,195 | 1,363 |

Coordenadas Geodésicas

Datum horizontal WGS84 (*World Geodetic System* 1984)

Datum Vertical Marégrafo de Imbituba/SC

ANEXO B – Listagem de Coordenadas dos Pontos de Controle utilizados na geração do MDE ASTER.

| *Coordenadas UTM | Altitude | Imagem | Predição | Erros | Erro |
|------------------|----------|--------|----------|-------|------|
|------------------|----------|--------|----------|-------|------|

| | (m) | | (m) | (pixel) | | (pixel) | | (m) | | Médio Quadrático (m) |
|----|-----------|------------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|----------------------|
| | X(E) | Y(N) | **Ort. | X | Y | X | Y | X | Y | |
| 1 | 476188.34 | 6672379.77 | 3.21 | 2259.63 | 3221.13 | 2259.62 | 3221.12 | -0.01 | -0.01 | 0.02 |
| 2 | 484683.81 | 6676678.33 | 85.58 | 2771.43 | 2845.86 | 2771.11 | 2846.15 | -0.32 | 0.29 | 0.43 |
| 3 | 484811.85 | 6667924.33 | 36.89 | 2875.44 | 3421.00 | 2875.16 | 3420.73 | -0.28 | -0.27 | 0.39 |
| 4 | 487258.67 | 6676618.27 | 64.52 | 2941.29 | 2822.29 | 2941.03 | 2822.16 | -0.26 | -0.13 | 0.29 |
| 5 | 486556.05 | 6660869.30 | 22.70 | 3067.11 | 3866.11 | 3066.88 | 3866.01 | -0.23 | -0.10 | 0.25 |
| 6 | 478385.88 | 6681972.87 | 1.76 | 2299.50 | 2566.29 | 2299.25 | 2566.16 | -0.25 | -0.13 | 0.28 |
| 7 | 480656.80 | 6678460.86 | 29.76 | 2487.14 | 2772.43 | 2486.91 | 2772.57 | -0.23 | 0.14 | 0.27 |
| 8 | 488946.41 | 6683380.46 | 4.60 | 2978.29 | 2359.00 | 2978.12 | 2358.91 | -0.17 | -0.09 | 0.20 |
| 9 | 484663.45 | 6660258.91 | 11.94 | 2949.33 | 3926.89 | 2949.15 | 3926.68 | -0.18 | -0.21 | 0.28 |
| 10 | 479862.69 | 6661014.19 | 5.04 | 2625.50 | 3928.75 | 2625.34 | 3929.01 | -0.16 | 0.26 | 0.30 |
| 11 | 482163.12 | 6674261.42 | 21.27 | 2632.00 | 3032.14 | 2631.81 | 3032.51 | -0.19 | 0.37 | 0.42 |
| 12 | 486681.33 | 6680628.27 | 12.87 | 2859.43 | 2564.86 | 2859.28 | 2564.58 | -0.15 | -0.28 | 0.32 |
| 13 | 477800.26 | 6674615.69 | 2.75 | 2341.29 | 3056.57 | 2341.14 | 3056.54 | -0.15 | -0.03 | 0.15 |
| 14 | 482103.99 | 6677235.30 | 33.81 | 2595.57 | 2837.29 | 2595.44 | 2837.50 | -0.13 | 0.21 | 0.25 |
| 15 | 487728.23 | 6665401.10 | 34.40 | 3094.56 | 3555.33 | 3094.43 | 3555.13 | -0.13 | -0.20 | 0.24 |
| 16 | 492851.06 | 6656273.10 | 9.73 | 3531.00 | 4100.00 | 3530.86 | 4100.23 | -0.14 | 0.23 | 0.27 |
| 17 | 490802.63 | 6666311.70 | 109.92 | 3286.67 | 3462.00 | 3286.57 | 3461.88 | -0.10 | -0.12 | 0.15 |
| 18 | 478581.85 | 6669359.37 | 43.54 | 2450.00 | 3393.67 | 2449.96 | 3393.87 | -0.04 | 0.20 | 0.20 |
| 19 | 487271.84 | 6671405.47 | 104.85 | 2998.88 | 3164.85 | 2998.84 | 3165.00 | -0.04 | 0.15 | 0.16 |
| 20 | 476347.64 | 6667418.17 | 15.14 | 2324.33 | 3546.11 | 2324.31 | 3545.80 | -0.02 | -0.31 | 0.31 |
| 21 | 489419.24 | 6668785.21 | 83.22 | 3168.63 | 3314.00 | 3168.62 | 3314.12 | -0.01 | 0.12 | 0.13 |
| 22 | 483703.78 | 6667342.04 | 78.87 | 2808.67 | 3471.33 | 2808.69 | 3471.05 | 0.02 | -0.28 | 0.28 |
| 23 | 486405.63 | 6673368.77 | 36.77 | 2920.43 | 3045.00 | 2920.45 | 3045.22 | 0.02 | 0.22 | 0.22 |
| 24 | 489584.26 | 6676669.87 | 84.99 | 3093.30 | 2793.29 | 3093.35 | 2793.53 | 0.05 | 0.24 | 0.25 |
| 25 | 491186.89 | 6657856.79 | 20.72 | 3404.11 | 4014.22 | 3404.18 | 4014.05 | 0.07 | -0.17 | 0.18 |
| 26 | 481051.97 | 6667906.37 | 83.00 | 2628.00 | 3462.33 | 2628.21 | 3462.67 | 0.21 | 0.34 | 0.40 |
| 27 | 483328.91 | 6667305.26 | 97.42 | 2784.22 | 3477.56 | 2784.45 | 3477.54 | 0.23 | -0.02 | 0.23 |
| 28 | 483359.71 | 6666035.57 | 41.76 | 2800.11 | 3560.67 | 2800.34 | 3560.74 | 0.23 | 0.07 | 0.24 |
| 29 | 481983.87 | 6680571.57 | 4.49 | 2550.86 | 2619.29 | 2551.09 | 2619.30 | 0.23 | 0.01 | 0.23 |
| 30 | 483101.70 | 6667664.50 | 102.74 | 2765.33 | 3456.33 | 2765.59 | 3456.36 | 0.26 | 0.03 | 0.26 |
| 31 | 482205.42 | 6682145.99 | 3.23 | 2548.14 | 2513.57 | 2548.45 | 2513.31 | 0.31 | -0.26 | 0.41 |
| 32 | 492296.03 | 6663052.40 | 41.98 | 3420.00 | 3660.11 | 3420.34 | 3660.16 | 0.34 | 0.05 | 0.34 |
| 33 | 484146.81 | 6674338.40 | 34.15 | 2761.00 | 3006.14 | 2761.37 | 3005.93 | 0.37 | -0.21 | 0.43 |
| 34 | 482941.98 | 6664491.05 | 20.89 | 2789.33 | 3667.00 | 2789.76 | 3666.89 | 0.43 | -0.11 | 0.44 |
| 35 | 483822.15 | 6683990.04 | 2.00 | 2634.14 | 2374.43 | 2634.59 | 2374.43 | 0.45 | 0.00 | 0.45 |

* Coordenadas UTM - Datum horizontal WGS84 (World Geodetic System 1984)

** Altitudes Ortométricas - Datum Vertical Marégrafo de Imbituba/SC

ANEXO C – Interface do software GEOGRID na geração dos MDEs Híbridos das diferentes áreas: plana, mista e acidentada.

ÁREA PLANA

```

C:\LINE\Arquivos para MDE Híbrido\HIBRIDO\GEOGRID_original2.exe
*****
*   GEOGRID - GRAUSOFT data gridding - vers. SEP 92 - (c) RF/KMS   *
*****
AreaPlana.dat
AreaPlana.grd
AreaPlana.err
1 -99 10 0 1
0.3 -10.5
1 0.03
-30.19101352 -30.16403254 -51.19911527 -51.16793122 0.0001355828 0.0001355828
rkm = 0.0, data selection area: -30.1913 -30.1638 -51.1994 -51.1676

data values per point: 1, used no.: 0
total points in file: 56955, selected:56809
min max mean stddev: -12.555 23.000 3.378 5.315
minimal and maximal standard deviations of data: -18.50 20.00

collocation prediction - sqrc0,xhalf(km),rmsn = 5.31 0.30 -18.50
selection: 10 closest points per quadrant
- large organization, rdat increased -

data organization limits: -30.1912 -30.1640 -51.1991 -51.1679
subrectangles (n,e,total): 24 24 576
size (km): 0.1 0.1, average pts per rect (rdat): 98.627
max points in subrects: 114, percentage with no points: 0.0

```

ÁREA MISTA

```

C:\LINE\Arquivos para MDE Híbrido\HIBRIDO\GEOGRID_original2.exe
*****
*   GEOGRID - GRAUSOFT data gridding - vers. SEP 92 - (c) RF/KMS   *
*****
AreaMista.dat
AreaMista.grd
AreaMista.err
1 -99 10 0 1
0.3 -42.16
1 0.03
-30.06171496 -30.03472949 -51.21674489 -51.18569125 0.0001355828 0.0001355828
rkm = 0.0, data selection area: -30.0620 -30.0345 -51.2171 -51.1854

data values per point: 1, used no.: 0
total points in file: 56864, selected:56718
min max mean stddev: -37.209 98.000 23.679 18.246
minimal and maximal standard deviations of data: -42.16 33.53

collocation prediction - sqrc0,xhalf(km),rmsn = 18.25 0.30 -42.16
selection: 10 closest points per quadrant
- large organization, rdat increased -

data organization limits: -30.0618 -30.0346 -51.2167 -51.1854
subrectangles (n,e,total): 24 24 576
size (km): 0.1 0.1, average pts per rect (rdat): 98.469
max points in subrects: 114, percentage with no points: 0.0

```

ÁREA ACIDENTADA

```

C:\LINE\Arquivos para MDE Híbrido\HIBRIDO\GEOGRID_original2.exe
*****
*   GEOGRID - GRAUSOFT data gridding - vers. SEP 92 - (c) RF/KMS   *
*****
AreaAcidentada.dat
AreaAcidentada.grd
AreaAcidentada.err
1 -99 10 0 1
0.3 -31
1 0.03
-30.20150479 -30.1745394 -51.13289696 -51.10173095 0.0001355828 0.0001355828
rkm = 0.0, data selection area: -30.2018 -30.1743 -51.1332 -51.1014

data values per point: 1, used no.: 0
total points in file: 56955, selected:56809
min max mean stddev: 12.000 256.559 89.475 55.205
minimal and maximal standard deviations of data: -31.00 67.71

collocation prediction - sqrc0,xhalf(km),rmsn = 55.20 0.30 -31.00
selection: 10 closest points per quadrant
- large organization, rdat increased -

data organization limits: -30.2016 -30.1745 -51.1329 -51.1017
subrectangles (n,e,total): 24 24 576
size (km): 0.1 0.1, average pts per rect (rdat): 98.627
max points in subrects: 114, percentage with no points: 0.0

```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)