

# *Pesquisas em Geociências*

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

---

## **Geração de um modelo digital de elevação híbrido a partir de dados altimétricos diferentes em tipo e precisão**

*Aline Gomes da Silva Druzina, Sergio Florencio de Souza*  
*Pesquisas em Geociências, 37 (3): 205-217, maio/ago., 2010.*

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/22660>

---

Publicado por

## **Instituto de Geociências**

---



## **Portal de Periódicos**

# **UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL

---

### **Informações Adicionais**

**Email:** [pesquisas@ufrgs.br](mailto:pesquisas@ufrgs.br)

**Políticas:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

**Submissão:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

**Diretrizes:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

---

Data de publicação - maio/ago., 2010.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

## Geração de um modelo digital de elevação híbrido a partir de dados altimétricos diferentes em tipo e precisão

Aline Gomes da Silva DRUZINA & Sergio Florencio de SOUZA

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, C.P. 15.001, CEP: 91.501-970, Porto Alegre, RS. E-mail: alinegsd@terra.com.br; sergio.florencio@ufrgs.br.

Recebido em 08/2009. Aceito para publicação em 08/2010.

Versão online publicada em 09/05/2011 ([www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br](http://www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br))

**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, o presente trabalho 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 30 m, 15 m e 90 m, respectivamente. Uma avaliação pontual foi realizada nos três dados onde se pode 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 Cartográfica) 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 mostraram que os dados altimétricos com diferentes resoluções espaciais podem ser integrados, desde que se tenha conhecimento das suas precisões.

**Palavras-chave:** modelo digital de elevação, colocação por mínimos quadrados, DEM híbrido.

**Abstract** - With the availability 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 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 (DEM) called Hybrid DEM, which was obtained through the integration of data from different techniques: Elevation Contours extracted from maps, Stereoscopy (ASTER) and Radar Interferometry (SRTM). To evaluate the efficiency of this methodology, were selected three areas in the city of Porto Alegre/RS, which showed different types of relief: plain, mixed and rough. In these areas, the DEM were generated from elevation contours and ASTER images, which had a resolution of 30m and 15m respectively; also included the SRTM data, which show a resolution of 90m. These three data sources were then integrated, using the Least Squares Collocation, and generating a new model with a final resolution of 15 m, which was called Hybrid DEM. Lastly, we performed an evaluation, in which the Hybrid DEM in the Plain Area showed an altimetric accuracy equal to 3,493 m and in the Mixed Area 4,763m, which follows the Class A requisites of the Standard of Cartographic Accuracy in the scale of 1:25.000. In the Rough Area, the value found was 8,66m, following the Class A requisites for Standard of Cartographic Accuracy in the scale of 1:50.000. The practical results show that altimetric data with different spatial resolutions may be integrated, as long as are aware of its precision.

**Keywords:** digital elevation model, least squares collocation, hybrid DEM.

## 1. Introdução

Um MDT (Modelo Digital de Terreno) pode ser definido como uma representação digital (numérica) do relevo do terreno. O termo MDE (Modelo Digital de Elevação) é usualmente utilizado para dados que apresentam somente a informação da altitude e estejam organizados em formato matricial. A criação de um Modelo Digital de Elevação corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema da elaboração e implantação de projetos em diversas áreas tais como: monitoramento ambiental, hidrologia, engenharia civil, geologia, telecomunicação, Sistema de Informação Geográfico (SIG), planejamento urbano e de transportes. Atualmente, se comparado com a representação analógica tradicional, um MDE tem as seguintes características específicas: uma variedade de formas de representação; pode manter sua precisão, com o passar do tempo, devido ao uso do meio digital; maior viabilidade de automatização e processamento em tempo real e a fácil representação em várias escalas. Muito mais do que uma forma de visualização tridimensional do relevo, um MDE é um banco de dados geográficos (Li *et al.*, 2005).

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, o LIDAR 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 do espectro óptico, a generalização de curvas de nível em regiões com relevo íngreme e a densidade de pontos necessária para a geração de um modelo mais próximo da realidade. Nenhuma técnica exis-

tente 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.

Tendo em vista os problemas de aproximações do relevo verdadeiro e integração dos diferentes métodos utilizados para a determinação de Modelos Digitais de Elevação faz-se necessário propor metodologia que faça uso desta diversidade de informações. Assim, este trabalho tem como objetivo a geração e avaliação de um novo Modelo Digital de Elevação, denominado Modelo Digital de Elevação Híbrido (MDEH), a partir de dados altimétricos obtidos pelas seguintes técnicas: Curvas de nível extraídas de carta 1: 50.000. Estereoscopia em imagens de um sensor orbital (ASTER- *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e Interferometria de imagens de Radar de abertura sintética em banda C (SRTM- *Shuttle Radar Topographic Mission*). Para a integração desses dados foi utilizado o método de Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ), muito utilizado na determinação do campo de gravidade, por permitir a integração de dados diferentes em tipo e precisão (Moritz, 1980).

A área escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa foi o município de Porto Alegre. Fundado em 26 de março de 1772, limitado aproximadamente pelo meridianos 51°01'W e 51°18'W e paralelos 29°56'S e 30°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 72 km. 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 1 mostra a localização das áreas e os bairros que compreendem, com limites em coordenadas geodésicas, referidas ao *datum* WGS84 (*World Geodetic System 1984*).

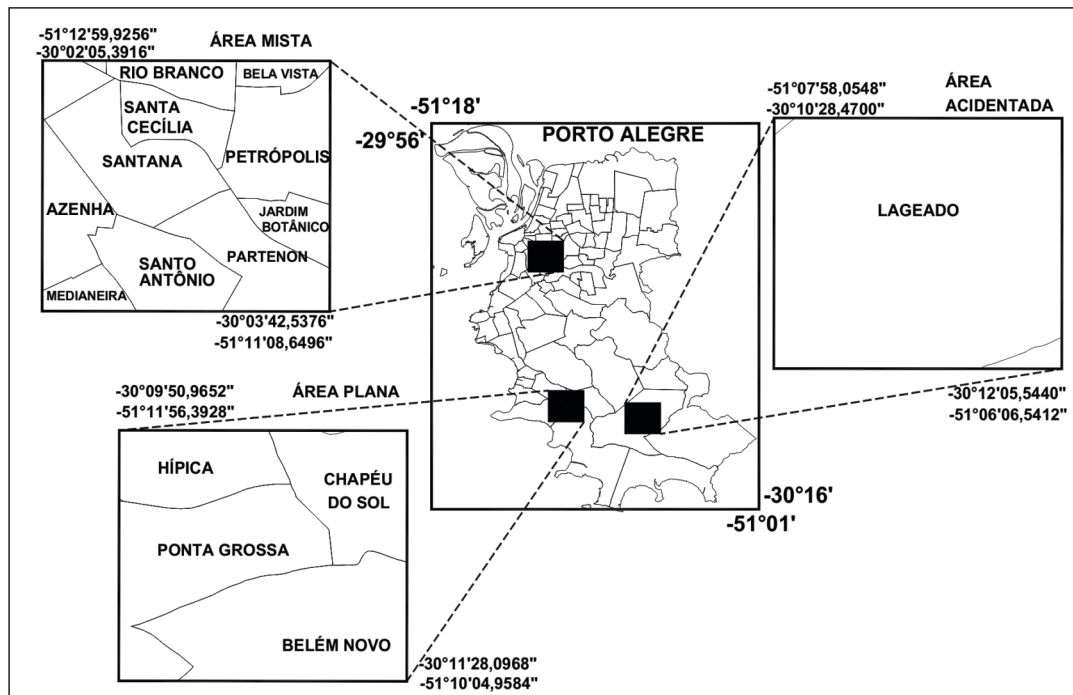


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo com os bairros abrangentes (fonte: Mapa Digital Oficial de Porto Alegre, PROCempa, disponível em <http://geo.procempa.com.br/geo/#>).

## 2. Aspectos metodológicos

### 2.1. Dados utilizados

A definição dos dados para a integração foi realizada visando selecionar diferentes técnicas de extração altimétrica sendo contemplados os seguintes tipos: Curvas de nível vetorizadas extraídas de Carta Topográfica de Porto Alegre, escala 1:50.000; imagem do sensor ASTER, bandas 3N e 3B e MDE gerado pela missão SRTM.

#### 2.1.1. Curvas de nível vetorizadas

As curvas de nível, com equidistância de 20 m, foram extraídas de carta topográfica 1: 50.000 do município de Porto Alegre, folha SH.22-Y-B-III-2, MI-2987/2, da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro onde as fotografias aéreas foram obtidas em 1975; o apoio de campo realizado em 1976, restituição fotogramétrica executada em aparelho de 2ª ordem em 1977, sendo a sexta impressão em 2000. A carta foi elaborada na projeção cartográfica UTM (*Universal Transversa de Mercator*), datum horizontal Córrego Alegre (MG) e o datum vertical Marégrafo de Torres (RS). Limites em coordenadas geodésicas: superior esquerdo  $-30^{\circ}00'$ ,  $-51^{\circ}15'$  e inferior direito  $-30^{\circ}15'$ ,  $-51^{\circ}00'$ .

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 a representação das curvas de nível com a altimetria associada aos dados vetoriais.

#### 2.1.2. Imagem ASTER

A imagem ASTER utilizada, cedida pela 1ª Divisão de Levantamento do Exército, foi obtida em 12 de setembro de 2003 às 13 h e 35 min e não apresenta cobertura de nuvens. O número de órbita é 19866 e as coordenadas de centro da cena são  $-29.9347^{\circ}$ ,  $-51.1820^{\circ}$ . O nível de processamento da imagem é o 1B. Segundo Tsu (1996) e Abrams & Hook (2002) o nível 1B apresenta 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 radiometricamente, sendo adotado o sistema geodésico de referência WGS84 e as coordenadas planas na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM).

### 2.1.3. MDE SRTM

Os dados da missão SRTM adquiridos são 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 projeto 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 (USGS, 2005; NASA, 2005)

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 metros e possuem um referencial ortométrico que foi obtido com base no modelo geoidal global EGM96 (Farr *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.

### 2.2. Colocação por mínimos quadrados

O modelo matemático adotado na geração do MDE Híbrido foi o método de Colocação por Mínimos Quadrados, desenvolvido e divulgado por Moritz (1980) na solução de problemas relacionados à determinação do campo de gravidade.

A conceituação do método de Colocação por Mínimos Quadrados é uma generalização do modelo paramétrico explicitamente linear e apresenta a fórmula 1 (Gemael, 1994; Moritz, 1980), que segue:

$$l = AX + n + s \quad (1)$$

Na fórmula básica da Colocação uma observação geodésica pode ser considerada formada por três partes:

a)  $AX$  = parte sistemática que traduz, por exemplo, o efeito nos cálculos do modelo geométrico adotado;

b)  $n$  = o ruído, parte aleatória correspondente aos “erros de medida”;

c)  $s$  = o sinal, parte aleatória representando neste trabalho os efeitos do relevo local.

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 (Gemael, 1994).

O modelo matemático básico pode ser visualizado por meio da figura 2, 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 torno de zero, é sobreposto a  $AX$ , dando a função  $AX + s$ . O problema é determinar esta curva  $AX + s$  por meio de  $l$  observações discretas (pontos numerados de 1 a 9), que são mais 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; Gemael, 1994).

Considerando-se a determinação do parâmetro  $X$  por ajustamento, a remoção do ruído por filtragem, e a computação de  $s$  para pontos diferentes dos pontos medidos como predição, pode-se dizer que o presente modelo combina ajustamento, filtragem e interpolação.

### 2.3. Métodos empregados

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi subdividida em três etapas: Composição da Verdade Terrestre; Geração de MDEs a partir de diferentes dados com avaliação do erro existente; Geração do MDE Híbrido e Avaliação da qualidade do MDE Híbrido.



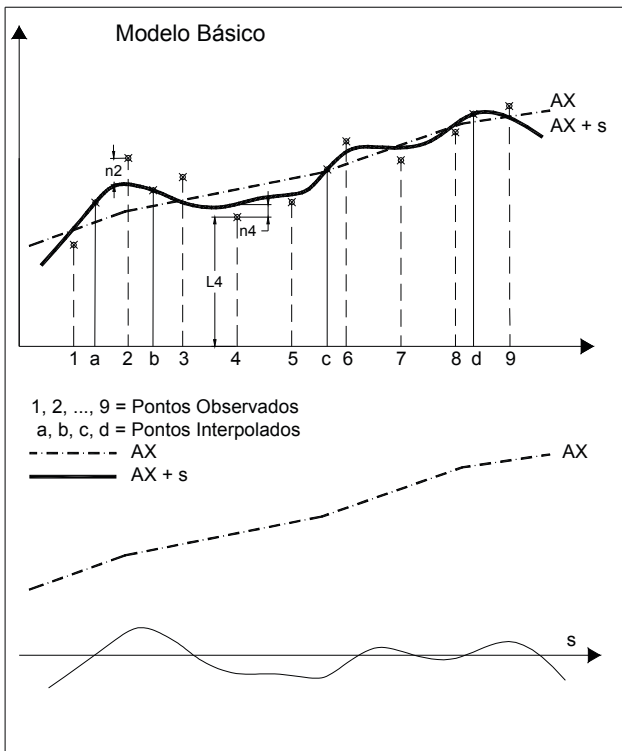


Figura 2. Esquema mostrando o Modelo Básico de Colocação por Mínimos Quadrados (adaptado de Moritz, 1980).

### 2.3.1. Composição da verdade terrestre

A necessidade de dados controlados, com precisão conhecida para uma posterior avaliação dos resultados obtidos justifica esta primeira etapa denominada: Composição da Verdade Terrestre a qual foi desenvolvida independentemente das demais e subdividida em cinco itens conforme a figura 3.

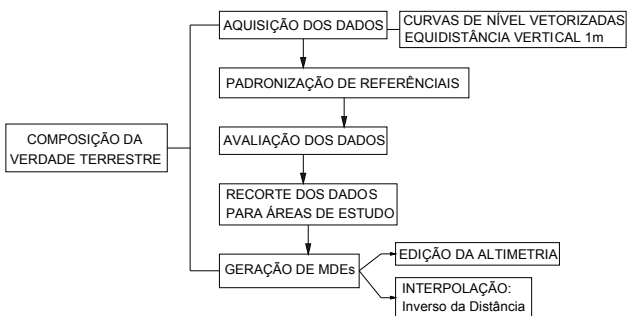


Figura 3. Fluxograma da 1ª Etapa - Composição da Verdade Terrestre.

A Secretaria do Planejamento Municipal (SPM) da Prefeitura Municipal de Porto Alegre cedeu para o desenvolvimento deste trabalho uma base altimétrica digital do município, constituída por 101 arquivos vetoriais no formato DWG, apresentando curvas de nível com equidistância verti-

cal de 1 m. 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 no período de 1982 a 1987. 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.

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 ajustar os dados ao sistema geodésico de referência adotado neste trabalho (coordenadas geodésicas, datum horizontal WGS84 e altitudes ortométricas). 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 de transformação (Tabela 1) entre o datum Observatório Comissão da Carta Geral do Brasil e o sistema geodésico WGS84 que, mesmo não sendo adotados oficialmente, foram utilizados neste trabalho (Salomoni, 2005). Esta transformação foi realizada através do software AutoCad Map 2000i que foi configurado para tal procedimento.

Tabela 1. Parâmetros de Transformação entre data Carta Geral e WGS84.

| Parâmetro      | Valor            |
|----------------|------------------|
| $\Delta X$ (m) | -105,3687744788  |
| $\Delta Y$ (m) | 128,2533004372   |
| $\Delta Z$ (m) | 5,9501954062     |
| RX (s)         | 0,2526444267     |
| RY (s)         | -4,91265506172   |
| RZ (s)         | -2,1177220547    |
| S              | 0,99998717166457 |

Todos os 101 arquivos foram convertidos constituindo uma base vetorial única (em coorde-

nadas 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. Para tanto foram utilizados 60 pontos de controle coletados com receptores GPS (*Global Positioning System*) de frequência simples sobre as Referências de Nível (RNs) da Rede Altimétrica de Porto Alegre por Goldani *et al.* (2002), sendo realizada uma comparação altimétrica da seguinte maneira: altitude do ponto de controle menos a altitude interpolada das duas curvas vizinhas mais próximas ao ponto. A tabela 2 apresenta o resultado obtido.

Tabela 2. Avaliação dos resíduos obtidos por Pontos de Controle menos Curvas de nível (1 m).

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| <b>Número de Pontos</b>          | 60           |
| <b>Soma (m)</b>                  | 13,743       |
| <b>Valor Mínimo (m)</b>          | -0,82        |
| <b>Valor Máximo (m)</b>          | 2,7          |
| <b>Média (m)</b>                 | 0,229        |
| <b>Mediana (m)</b>               | 0,07         |
| <b>Desvio Padrão (m)</b>         | 0,641        |
| <b>Erro Médio Quadrático (m)</b> | <b>0,676</b> |

Para o cálculo da precisão das curvas de nível através da teoria de propagação de erros aleatórios foi considerada a precisão da altitude dos pontos de controle de 4,447cm calculada em Goldani *et al.* (2002) e o erro médio quadrático determinado. O valor estimado para a precisão das curvas de nível foi de 0,6775 m.

Após esta avaliação as três áreas de estudo 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, considerados verdade terrestre, fossem comparados com os demais MDEs gerados neste trabalho. Como as curvas de nível não apresentavam a altimetria associada a cada vetor, encontrando-se apenas descrita em formato texto sobre as curvas mestras e em pontos cotados, 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 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 e a dimensão da grade regular destes MDEs foi a mesma dos MDEs a serem avaliados: 15 m, 30 m e 90 m. 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 nos arquivos das curvas de nível, grande amostragem, densidade muito maior do que as resoluções dos MDEs a serem avaliados e também à necessidade da geração de uma superfície mais próxima possível dos pontos base.

### 2.3.2. Geração de MDEs a partir de diferentes dados e avaliação do erro existente

A segunda etapa foi subdividida em três fases, levando-se em conta os diferentes tipos de dados e técnicas de geração de MDE, denominadas: MDE Cartas, MDE ASTER e MDE SRTM.

#### MDE cartas

Para a geração e avaliação de MDE a partir das curvas de nível extraídas da carta topográfica 1: 50.000, os procedimentos obedeceram a seguinte ordem (Fig. 4).

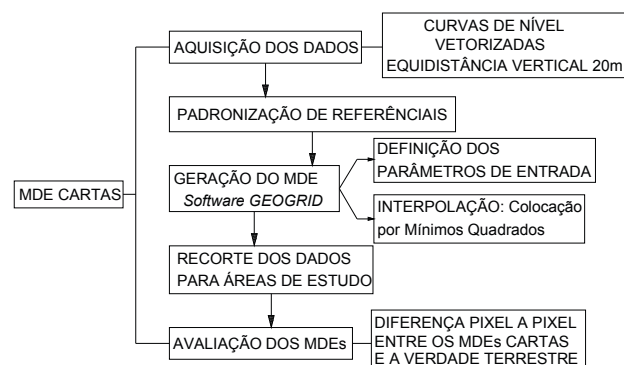


Figura 4. Fluxograma MDE Cartas.

Após a aquisição do arquivo vetorial de curvas de nível com equidistância vertical de 20 m

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 de interpolação: o de Médias Ponderadas e a Colocação por Mínimos Quadrados. Este *software* foi desenvolvido 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 (fórmula 2):

$$C(d) = C_0 \left(1 + \frac{d}{a}\right) e^{-\frac{d}{a}} \quad (2)$$

onde:  $d$  é a distância entre os pontos;  $C_0$  e  $a$  são parâmetros determinados pelo programa a partir dos dados de entrada.; e  $e$  é a base neperiana.

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, 90 m de distância máxima para a interpolação que é três vezes a resolução espacial adotada para este MDE (30 m). 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: um com a grade do MDE e outro com a grade de erros da interpolação.

Para a determinação deste MDE os dados em formato DXF foram convertidos para texto e uma

quinta coluna foi adicionada a este arquivo com o erro a priori das altitudes. De forma a simplificar os procedimentos optou-se por assumir como erro a priori dos dados a pior hipótese do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) Altimétrico para uma Carta Topográfica na escala 1:50.000 que é a Classe C,  $\frac{3}{4}$  da equidistância das curvas de nível (20m) igual a 15m para todos os pontos (Brasil, 1984).

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 30 m. 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, um 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 e o MDE Verdade Terrestre gerado com resolução de 30m em formato de grade. Os resíduos, calculados *pixel a pixel*, apresentam-se em uma nova coluna no arquivo texto do MDE Cartas.

### MDE ASTER

A geração do MDE a partir da imagem ASTER seguiu a metodologia apresentada na figura 5.

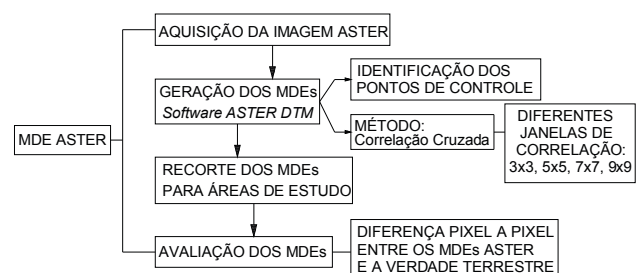


Figura 5. Fluxograma MDE ASTER.



A geração de MDEs a partir do par estereoscópico das imagens, banda 3N e banda 3B, do sensor ASTER foi realizada 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 (Steinmayer, 2003). 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, referente às condições geométricas dessa imagem e de seu sistema geodésico. Como neste trabalho o referencial altimétrico adotado é o ortométrico utilizamos os pontos de controle de Goldani *et al.* (2002), 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. Existem ainda opções de geração em diferentes resoluções espaciais: 15 m, 30 m e 60 m. Como as bandas 3N e 3B apresentam originalmente resolução espacial de 15 m, todos os MDEs ASTER foram gerados com a melhor resolução: 15m.

Ao todo foram gerados 4 MDEs ASTER (janelas 3x3, 5x5, 7x7 e 9x9) com resolução de 15 m 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 nas etapas posteriores. A ferramenta *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00 foi utilizada para calcular a diferença dos MDEs ASTER e os dados da Verdade Terrestre. Os resíduos apresentados foram analisados estatisticamente e foi adotado o MDE de menor Erro Médio Quadrático (Tab. 3). 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 3. 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                  | 64.800  | 64.800  | 64.800  | 64.800  |
| Valor Mínimo (m)                  | -33,34  | -20     | -20     | -19,91  |
| Valor Máximo (m)                  | 54,97   | 46,51   | 20,33   | 11,95   |
| Média (m)                         | 2,24    | 1,71    | 2,16    | 2,11    |
| Desvio Padrão (m)                 | 6,71    | 5,6     | 4,68    | 4,23    |
| EMQ* (m)                          | 7,07    | 5,86    | 5,15    | 4,73    |
| ÁREA MISTA                        |         |         |         |         |
| Dimensão da Janela                | 3X3     | 5X5     | 7X7     | 9X9     |
| Número de Pontos                  | 311.917 | 311.917 | 311.917 | 311.917 |
| Valor Mínimo (m)                  | -69,67  | -64,95  | -64,36  | -68,37  |
| Valor Máximo (m)                  | 67,98   | 61,72   | 38,8    | 30,81   |
| Média (m)                         | -1,26   | -2,5    | -1,95   | -2,56   |
| Desvio Padrão (m)                 | 8,23    | 6,34    | 5,68    | 5,7     |
| EMQ* (m)                          | 8,33    | 6,82    | 6,01    | 6,25    |
| ÁREA ACIDENTADA                   |         |         |         |         |
| Dimensão da Janela                | 3X3     | 5X5     | 7X7     | 9X9     |
| Número de Pontos                  | 357.979 | 357.979 | 357.979 | 357.979 |
| Valor Mínimo (m)                  | -35,75  | -37     | -31,84  | -42,65  |
| Valor Máximo (m)                  | 212,93  | 213,17  | 212,34  | 210,38  |
| Média (m)                         | -3,13   | -4,27   | -3,42   | -3,75   |
| Desvio Padrão (m)                 | 7,8     | 6,68    | 6,08    | 6,79    |
| EMQ* (m)                          | 8,41    | 7,93    | 6,98    | 7,75    |
| Resolução espacial dos MDEs = 15m |         |         |         |         |
| * EMQ = Erro Médio Quadrático     |         |         |         |         |

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.

### MDE SRTM

A última fase desta etapa foi a análise dos dados do 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 foi bastante simples como mostrado no fluxograma da figura 6.

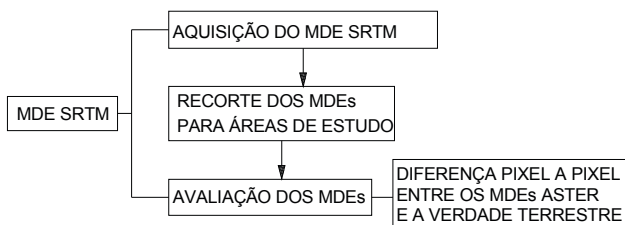


Figura 6. Fluxograma MDE SRTM.

O MDE SRTM apresenta resolução espacial de cerca de 90 m 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 16 m 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 e a ferramenta *Residuals* do *software* Surfer Versão 8.00, onde foram calculados as diferenças entre os MDEs da verdade terrestre e os dados do SRTM em formato texto.

#### 2.3.3 Geração e avaliação do MDE Híbrido

A terceira etapa foi realizada após a geração e avaliação dos MDEs a partir dos três tipos de dados (Cartas, ASTER e SRTM) pode-se iniciar a integra-

ção dos mesmos. 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, com a seguinte 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 15 m, inseriu-se os dados do MDE Cartas, resolução espacial de 30 m, e logo após os dados do MDE SRTM, resolução 90 m, 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 30 m e o número de pontos fechados por quadrante igual a 10. A resolução espacial adotada para o MDE Híbrido foi de 15 m (melhor resolução existente entre os dados utilizados).

Para avaliar a precisão dos MDEs Híbridos gerados, usou-se dos dados que compõem a verdade terrestre. As curvas de nível da verdade terrestre foram transformadas em dados pontuais, 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 as mesmas posições X,Y. A resolução espacial dos MDEs Híbridos para as diferentes áreas é de 15 m, equivalente a uma área de 225 m<sup>2</sup>. Neste tipo de análise, pode-se calcular diversos resíduos para um mesmo *pixel*, tantos quantos existirem pontos dentro da área de cada *pixel*. Uma avaliação estatística sobre estes resíduos foi realizada obtendo-se a precisão dos MDEs e o LE90, erro linear com nível de confiança de 90% probabilístico, seguindo metodologia de avaliação proposta por Paradella *et al.* (2005).

### 3. Resultados

Os MDEs gerados a partir das diferentes fontes de dados altimétricos (Cartas, ASTER e SRTM), resultados parciais deste trabalho, foram avaliados *pixel a pixel* através da comparação dos dados destes MDEs com os MDEs da verdade terrestre. Os resultados destas avaliações foram analisados estatisticamente (Tab. 4).

Tabela 4. Avaliação dos diferentes dados, SRTM, CARTAS e ASTER.

|                 | Dados                   | SRTM         | CARTAS       | ASTER        |
|-----------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| ÁREA PLANA      | Número de <i>pixels</i> | 1.400        | 9.555        | 46.000       |
|                 | Valor Mínimo (m)        | -2           | -17,875      | -18,5        |
|                 | Valor Máximo (m)        | 13           | 14,63        | 19,999       |
|                 | Média (m)               | 2,728        | 0,703        | -2,287       |
|                 | Desvio Padrão (m)       | 2,038        | 5,602        | 4,021        |
|                 | EMQ*(m)                 | <b>3,404</b> | 5,645        | 4,626        |
|                 | LE90(m) = 1,6449 x EMQ  | 5,6          | 9,286        | 7,609        |
| ÁREA MISTA      | Número de <i>pixels</i> | 1.400        | 9.555        | 46.000       |
|                 | Valor Mínimo (m)        | -13,42       | -14,216      | -42,16       |
|                 | Valor Máximo (m)        | 31,063       | 21,671       | 33,531       |
|                 | Média (m)               | 6,794        | 1,53         | 2,146        |
|                 | Desvio Padrão (m)       | 4,703        | 4,348        | 6,345        |
|                 | EMQ* (m)                | 8,262        | <b>4,609</b> | 6,698        |
|                 | LE90(m) = 1,6449 x EMQ  | 13,59        | 7,582        | 11,018       |
| ÁREA ACIDENTADA | Número de <i>pixels</i> | 1.400        | 9.555        | 46.000       |
|                 | Valor Mínimo (m)        | -25,95       | -23,229      | -31          |
|                 | Valor Máximo (m)        | 38,308       | 67,707       | 30,951       |
|                 | Média (m)               | 6,321        | 12,188       | 3,349        |
|                 | Desvio Padrão (m)       | 8,96         | 11,916       | 5,596        |
|                 | EMQ*(m)                 | 10,963       | 17,045       | <b>6,522</b> |
|                 | LE90(m) = 1,6449 x EMQ  | 18,032       | 28,037       | 10,728       |

\* EMQ = Erro Médio Quadrático

Assim, pode-se verificar que na Área Plana o dado que apresentou menor Erro Médio Quadrático foi o MDE SRTM igual a 3,404 m, na Área Mista foi o MDE Cartas com 4,609 m e na área Acidentada foi o MDE ASTER com o valor de 6,522 m. Estes MDEs e os seus respectivos mapas dos erros apresentam-se em Druzina (2008). Como resultado final, os MDEs Híbridos gerados para as diferentes áreas de estudo e os respectivos mapas dos erros associados encontram-se na figura 7, onde os erros estão divididos em 10 intervalos iguais.

Os mapas de erros representam a avaliação dos MDEs Híbridos com relação aos pontos que compõem a verdade terrestre. 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. A tabela 5 apresenta estes resultados analisados estatisticamente.

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.

Tabela 5. Avaliação dos resíduos obtidos por Verdade Terrestre menos MDE Híbrido Áreas Plana, Mista e Acidentada.

| ÁREAS             | PLANA        | MISTA        | ACIDENTADA  |
|-------------------|--------------|--------------|-------------|
| Número de Pontos  | 64.993       | 312.865      | 359.416     |
| 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       |
| EMQ* (m)          | 3,427        | 4,715        | 8,634       |
| Precisão (m)      | <b>3,493</b> | <b>4,763</b> | <b>8,66</b> |

\* EMQ = Erro Médio Quadrático

Diferentes resultados foram constatados através das análises, demonstrados na figura 7 e na tabela 5, sendo descritos a seguir com relação às áreas de estudo:

a) Área Plana: a maioria dos resíduos estão dentro do intervalo de 1,7 m a 5,2 m. Sendo 40,1% dos pontos com erros dentro do intervalo de 1,7 m a 3,5 m, 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 -3,83 m. 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 nível de confiança de 90% probabilístico) igual a 5,745 m. Assim, 90% dos *pixels* do MDE Híbrido gerado para a Área Plana apresentam variação em altitude em relação à "altitude verdadeira" de 5,745 m ou menos.

b) Área Mista: pode-se verificar que a maioria dos erros está no intervalo de -2,2 m a 6,7 m, sendo 34,6% dos pontos com erros dentro do intervalo de 2,2 m a 6,7 m. Este MDE apresentou áreas com valores altimétricos abaixo de zero sendo o valor mínimo encontrado de -14,55m. Isto se deve em grande parte aos dados de entrada do MDE ASTER que apresentam áreas negativas com valor mínimo de -37,21m. A precisão estimada do MDE Híbrido da Área Mista foi de 4,763 m, e 90% dos *pixels* apresentam variação em altitude em relação à "altitude verdadeira" de 7,835 m ou menos.

c) Área Acidentada: pode-se verificar que a maioria dos erros dentro do intervalo de -15m a 0,21m, sendo 29,8% dos pontos com erros dentro do intervalo de -4,8 m a 0,21 m. Isto demonstra que



grande parte da superfície interpolada está acima não apresentou áreas com valores altimétricos abaixo de zero. A precisão estimada do MDE Híbrido

do da Área Acidentada foi de 8,660 m e o LE90 Área Acidentada igual a 14,245 m.

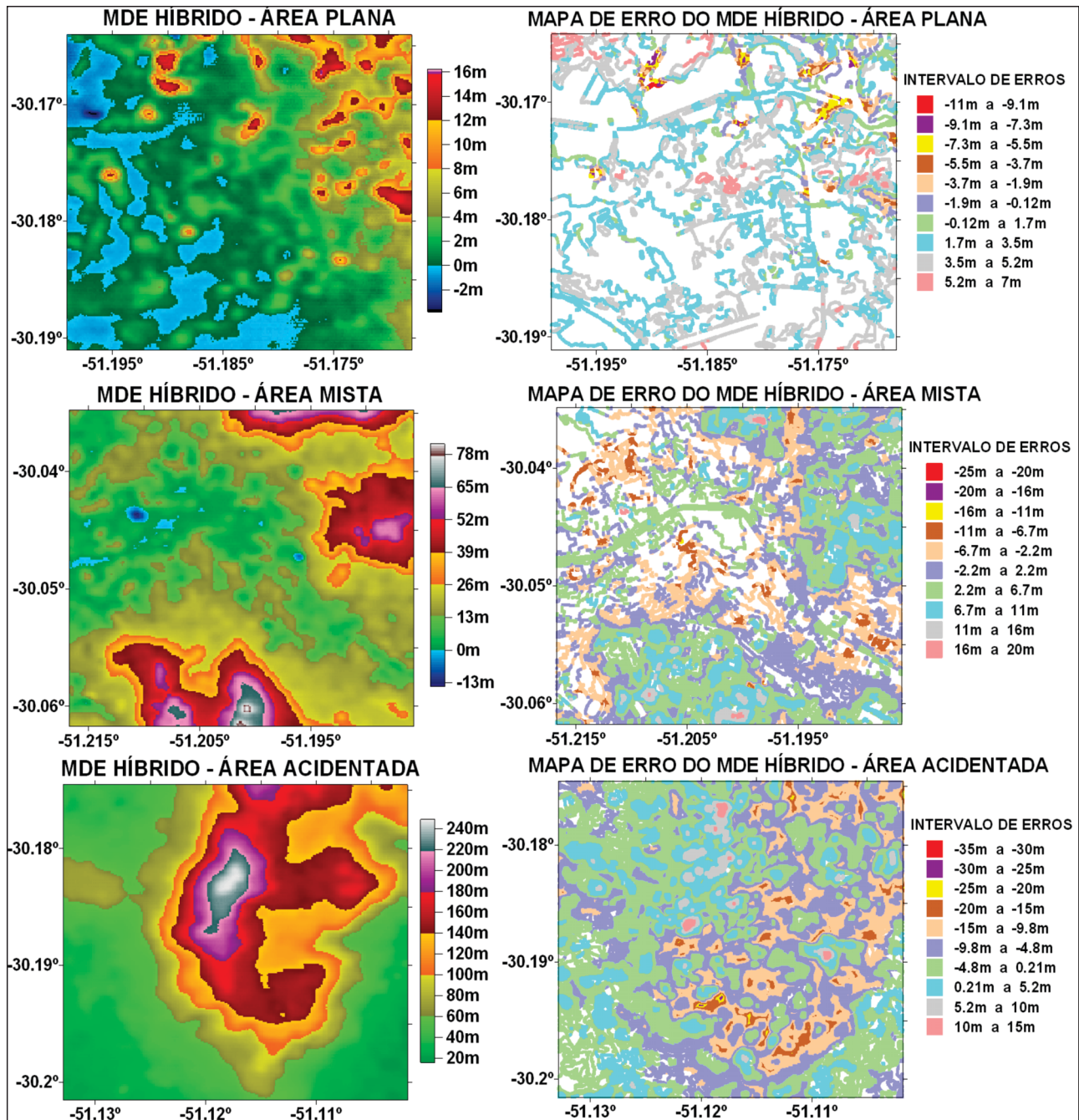


Figura 7. MDEs Híbridos gerados para as diferentes áreas de estudo e respectivos mapas do erro associado.

#### 4. Conclusões

Neste trabalho 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 alti-

métricos obtidos de diferentes técnicas: curvas de nível extraídas de carta 1:50.000, estereoscopia em imagens de um sensor orbital (ASTER) e interferometria de radar de abertura sintética (SRTM). O novo modelo foi denominado de MDE Híbrido, sendo que a sua avaliação levou às seguintes conclusões.

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 possivelmente devido a problemas na amostragem; nas cartas a equidistância das curvas de nível é de 20 m 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.

O MDE ASTER foi gerado com sucesso, sendo o modelo que obteve menor Erro Médio Quadrático em Área Acidentada (6,522 m). 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.

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

Considerando o Decreto Lei nº 89817 de 20/06/1984, que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da Comissão de Cartografia do Brasil (COCAR), os produtos cartográficos podem ser classificados em classes denominadas A, B e C, segundo os critérios de PEC planimétricos e altimétricos. O MDE Híbrido gerado para a Área Plana apresentou uma acurácia altimétrica igual a

3,493 m o que atende aos requisitos da Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica na escala 1:25.000. Para a Área Mista foi determinado o valor de 4,763 m 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 8,66 m atendendo os requisitos da Classe A do PEC na escala 1:50.000.

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.

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. 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.

**Agradecimento-** Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de mestrado ao primeiro autor.

## Referências

- Abrams, M. & Hook, S. 2002. *ASTER User Handbook*, JPL Publ., Disponível em <<http://astwerweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso em 5 jun. 2007.
- Brasil. 1984. *Decreto Lei 89.817 - Padrão de Exatidão Cartográfica*.
- Druzina, A.G.S. 2008. *Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação*. Porto Alegre, 79p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto, Uni-



- versidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. & Alsdorf, D. 2007. *The Shuttle Radar Topography Mission*. Reviews of Geophysics, vol. 45, RG2004, 33 PP.
- Gemael, C. 1994. *Introdução ao Ajustamento de Observações- Aplicações Geodésicas*. Curitiba. Editora da UFPR, 319 p.
- Goldani, D., Genro, R., & Salomoni, R. 2002. *Determinação de um modelo geoidal local para o município de Porto Alegre*. Porto Alegre, 58p. Monografia de Conclusão do Curso, Curso de Engenharia Cartográfica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Li, Z., Zhu, Q. & Gold, C. 2005. *Digital Terrain Modeling - Principles and Methodology*. CRC Press. 323p.
- Moritz, H. 1980. *Advanced Physical Geodesy*. West Germany, Herbert Wichmann Verlag, 500pp.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. 2005. *SRTM*, Disponível em <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>>. Acesso em 29 de agosto de 2005.
- Paradella, W. R., Cecarelli, I.C.F., Luiz, S., Oliveira, C.G. & Okida, R. 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.
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M. & Daffer, W. 2005. *An assessment of the SRTM topographic products*, Technical Report JPLD-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory 143 pp.
- 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*. Porto Alegre, 45p. Monografia de Conclusão do Curso, Curso de Engenharia Cartográfica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Steinmayer, M. 2003. Extração de Modelos Digitais de Terreno com o sensor ASTER. *InfoGeo*, Curitiba, ano 5, n. 30, Painel Tecnológico, p. 38 - 39.
- Tsu, H. 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.