

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM
DE SISTEMAS AMBIENTAIS

JOSYCEYLA DUARTE MORAIS

AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO
PROVENIENTES DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE
DISTRIBUIÇÃO GRATUITA

BELO HORIZONTE

2017

Josyceyla Duarte Morais

**Avaliação de Modelos Digitais de Elevação Provenientes de Dados de
Sensoriamento Remoto de Distribuição Gratuita**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó
Elmiro

Belo Horizonte

2017

M827a 2017 Morais, Josyceyla Duarte.
Avaliação de modelos digitais de elevação provenientes de dados de sensoriamento remoto de distribuição gratuita [manuscrito] / Josyceyla Duarte Morais. – 2017.
94 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2017.

Bibliografia: f. 89-94.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Solo – Uso – Aspectos ambientais – Belo Horizonte (MG) – Teses. 3. Altitudes – Levantamento – Teses. 4. Sensoriamento remoto – Teses. I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



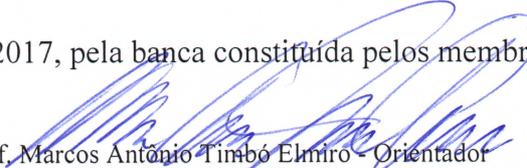
FOLHA DE APROVAÇÃO

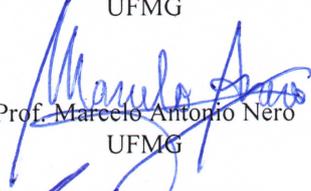
MODELAGEM DE ERROS ALTIMÉTRICOS EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO PROVENIENTES DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE DISTRIBUIÇÃO LIVRE

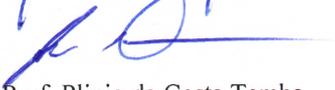
JOSYCEYLA DUARTE MORAIS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 12 de maio de 2017, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Marcos Antonio Tinóbio Elmiro - Orientador
UFMG


Prof. Marcelo Antonio Nero
UFMG


Prof. Plinio da Costa Temba
UFMG


Prof. Bráulio Magalhães Fonseca
UFMG

Belo Horizonte, 12 de maio de 2017.

*À minha vizinha Raimunda, a mais sábia da família,
dedico.*

Agradecimentos

Sempre que rezei com fé fui atendida e coisas incríveis aconteceram. A Deus e a Jesus Cristo minha devoção e gratidão.

Aos meus pais Conceição e Zezinho que me proporcionaram educação moral, acadêmica e visão de futuro. Eles são meu exemplo de vida, cidadania e amor.

As minhas irmãs Jáyra e Mielly e ao meu namorado Aurélio, os melhores e verdadeiros amigos, pelo companheirismo, incentivo e ajuda.

Aos professores do IGC-UFMG e aos colegas do mestrado pelo conhecimento compartilhado.

Ao meu orientador Dr. Marcos Antonio Timbó Elmiro, exemplo de pessoa e profissional.

A Pâmela, secretária do Programa, por toda a assistência prestada.

As companheiras de moradia Cleidi, Mariana e Jéssica, que durante minha estadia em Belo Horizonte foram verdadeiras amigas.

A todos que sempre torceram por mim e me incentivaram.

A Belo Horizonte e a UFMG que me receberam com tanto carinho.

A PRODABEL, pela concessão dos dados LIDAR. O incentivo a pesquisa através da disponibilização de dados geográficos é de suma importância para o desenvolvimento da educação profissional e melhoramento das técnicas que empregam geotecnologias.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos em nível de mestrado.

“A natureza reservou para si tanta liberdade que não a podemos nunca penetrar completamente com o nosso saber e a nossa ciência”.

(Johann Goethe)

RESUMO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são uma importante forma de representação das variações altimétricas da superfície da Terra. Os MDEs gratuitos oriundos de sensoriamento remoto têm ganhado destaque, e a maior parte das aplicações estão concentradas na área de Geociências, sobretudo nos estudos geomorfológicos. Na escolha do MDE a ser utilizado, a precisão do produto, a escala de mapeamento, as características da área de aplicação, assim como os erros advindos do processo de aquisição dos dados, devem ser levados em consideração. Tendo em vista que, estão à disposição dos usuários MDEs em diferentes resoluções, com métodos de aquisição e processamentos diferentes, torna-se importante o desenvolvimento de estudos que avaliem a precisão altimétrica dos MDEs e investiguem variáveis que influenciam a ocorrência de erros na representação da elevação registrada. Este trabalho teve por objetivo avaliar a precisão altimétrica dos seguintes MDEs disponibilizados de forma gratuita e oriundos de sensoriamento remoto: SRTM banda C (SRTM v3), ASTER GDEM v2, TOPODATA, todos com resolução espacial de arco de 1 segundo que equivale a aproximadamente 30 metros e SRTM banda C com resolução espacial de arco de 3 segundos que equivale a aproximadamente 90 metros (SRTM v2). Além de investigar a relação entre os erros observados e as variáveis de influência: classes de declividade do relevo (plano, suave ondulado, ondulado, montanhoso e escarpado) e tipo de cobertura do solo (água, urbana unifamiliar, urbana verticalizada, terreno aberto e vegetação). Como referência, foram utilizados dados provenientes de tecnologia *Light Detection and Ranging* (LIDAR), com precisão altimétrica da ordem de 25 cm. A área de estudo é uma área urbana densamente povoada (Belo Horizonte – MG). A avaliação levou em consideração princípios do sensoriamento remoto e utilizou os métodos de análise de histogramas, perfis topográficos, coeficiente de correlação, análise de regressão, RMSE, análise da distribuição estatística e espacial dos erros e Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD do Brasil. Os resultados indicaram forte correlação positiva e a existência de relação funcional entre os modelos avaliados e o modelo de referência. O modelo que apresentou menores erros altimétricos para representação da área de estudo foi o SRTM v3. A análise da distribuição da frequência estatística dos erros apontou ganho do SRTM v3 em relação aos demais modelos. Na escala de 1:50.000 a classificação do PEC-PCD indicou padrão classe B para o SRTM v3, padrão classe C para o ASTER GDEM, padrão classe D para o TOPODATA, já o SRTM v2 não obteve nenhuma classificação nessa escala. Foi constatado que, em ambos os modelos avaliados, os erros altimétricos crescem conforme aumenta a declividade. O SRTM v3 apresentou os menores erros altimétricos para representar todas as classes de declividade do relevo, com exceção do relevo escarpado (declives acima de 75%), para a qual o ASTER GDEM mostrou-se mais vantajoso. Os métodos de estereoscopia e interferometria apresentaram limitações para representar a altimetria em corpos d'água. O aumento dos erros altimétricos em relação aos tipos de cobertura do solo se deu na seguinte ordem: urbana verticalizada, água, vegetação, terreno aberto e urbana unifamiliar. Com a representação da distribuição espacial dos erros altimétricos nos modelos foi possível visualizar a dispersão ou concentração dos erros e onde eles ocorrem.

Palavras-chave: *Modelos Digitais de Elevação, SRTM v3, ASTER GDEM v2, TOPODATA, SRTM v2, avaliação altimétrica, declividade, cobertura do solo.*

ABSTRACT

The Digital Elevation Models (DEM) are an important data model to representation of the altimetric variations of the Earth surface. Free DEMs from remote sensing have gained prominence, and most applications are concentrated in the area of Geosciences, mainly geomorphological studies. In choosing the DEM to be used, the accuracy of the product, the mapping scale, the characteristics of the area of application, as well as the errors arising from the data acquisition process, must be taken into account. Given that DEM users are available to different resolutions with different acquisition and processing methods, it is important to develop studies that evaluate the altimetric accuracy of the DEMs and investigate variables that influence the occurrence of errors in the representation of the registered elevation. This work aimed to evaluate altimetric accuracy of the following DEMs available free of charge and from remote sensing: SRTM C-band (SRTM v3), ASTER GDEM v2, TOPODATA, both with spatial resolution of 1 arc-second that equivalent to approximately 30 meters and SRTM C-band with spatial resolution of 3 arc-seconds that is approximately 90 meters (SRTM v2). In addition to investigating the relationship between the observed errors and the influence variables: land slope classes (flat, smooth corrugated, corrugated, mountainous and steep) and type of ground cover (water, urban - average of two storey, urban - high buildings, vegetation). LIDAR data with 25 cm vertical accuracy were used as reference for assessment validation. The study area is a densely populated urban area (Belo Horizonte - MG). The evaluation took into account remote sensing principles and used the methods of analysis of histograms, topographic profiles, correlation coefficient, regression analysis, RMSE, analysis of the statistical and spatial distribution of errors and Cartographic Accuracy Standard of Digital Cartographic Products (PEC-PCD) of Brazil. The results indicated strong positive linear correlation and the existence of a functional relationship between the evaluated models and the reference model. The model that presented the smallest altimetric errors to represent the study area was SRTM v3. The analysis of the statistical frequency distribution of the errors determined to the SRTM v3 gain in relation to the other models. Considering 1: 50,000 mapping scale the PEC-PCD classification indicated class B standard for SRTM, class C for ASTER GDEM, class D for TOPODATA and SRTM v2 did not score on this mapping scale. It was verified that, in both models evaluated, the altimetric errors increase as the slope increases. The SRTM v3 presented the smallest altimetric errors to represent all classes of geomorphological units, with exception of steep geomorphological units (slopes above 75%), for which ASTER GDEM proved to be more advantageous. The stereoscopy and interferometry methods presented limitations to represent the altimetry in water bodies. The increase in altimetric errors in relation to the types of land cover occurred in the following order: urban (high buildings), water, vegetation, open land and urban (average of two storey). With the representation of the spatial distribution of altimetric errors of the models it was possible to visualize the dispersion or concentration of the errors and where they are located.

Keywords: *Digital Elevation Models, SRTM v3, ASTER GDEM, TOPODATA, SRTM v2, altimetry assessment, slope, land cover.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Processo de criação de um par estereoscópico de imagens orbitais pelo instrumento ASTER – sensor VNIR	25
Figura 2	Esquema de funcionamento de transmissão e recebimento das ondas de radar na missão SRTM	27
Figura 3	Relevo sombreado de modelos de elevação gerados com dados SRTM banda C e TOPODATA tratados com krigagem	29
Figura 4	Distorções geométricas em imagens de radar	31
Figura 5	Mecanismos de retroflexão do sinal de radar em diferentes tipos de superfície	36
Figura 6	Reflexão em superfícies lisas (A) e em superfícies rugosas (B)	36
Figura 7	Tonalidades mais claras, superfícies rugosas, maior retroespalhamento; B) Tonalidades mais escuras, superfícies lisas, menor retroespalhamento	37
Figura 8	Metodologia da pesquisa	40
Figura 9	Área de estudo (Belo Horizonte – Minas Gerais)	41
Figura 10	Mapa de declividade da área de estudo, classes definidas conforme EMBRAPA (1979)	45
Figura 11	Histogramas dos Modelos	53
Figura 12	Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação (R^2)	54
Figura 13	Gráfico da distribuição dos resíduos entre ASTER GDEM v2/ SRTM v3/ TOPODATA e o modelo de referência	57
Figura 14	Gráfico da distribuição dos resíduos entre SRTM v2 e o modelo de referência	58
Figura 15	Valores de RMSE (m) para as classes de declividade do relevo	62
Figura 16	Perfis topográficos em trechos de alta e baixa declividade	62
Figura 17	Etapas metodologias: análise da relação entre erros altimétricos em MDEs e tipos de cobertura do solo	63
Figura 18	Localização das áreas definidas para avaliação quanto ao tipo de cobertura do solo sobrepostas a imagem RapidEye de 08/09/2011 em composição RGB 123	66

Figura 19	Perfis topográficos para cobertura do solo do tipo água	67
Figura 20	Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo terreno aberto	70
Figura 21	Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo urbana unifamiliar	71
Figura 22	Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo urbana verticalizada	73
Figura 23	Identificação de área com edificações verticalizadas	75
Figura 24	Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo vegetação	76
Figura 25	RMSE (m) para as classes de cobertura do solo	78
Figura 26	Representação da distribuição espacial dos erros altimétricos no modelo ASTER GDEM em relação à declividade	80
Figura 27	Representação da distribuição espacial dos erros altimétricos no modelo SRTM v3 em relação a declividade	81
Figura 28	Representação espacial da distribuição dos erros altimétricos em relação à altimetria	82
Figura 29	Erros altimétricos observados no MDE SRTM v3	83
Figura 30	Erros altimétricos observados no MDE ASTER GDEM	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características do Instrumento ASTER	24
Tabela 2	Demonstrativo da tabela que relaciona dados de localização, elevação e declividade, neste caso para os MDEs de tamanho de pixel de 30 metros	43
Tabela 3	Pontos checados por classe de declividade	45
Tabela 4	Pontos checados por classe de cobertura do solo	46
Tabela 5	Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais	48
Tabela 6	Descrição dos modelos avaliados	50
Tabela 7	Estatísticas descritivas	53
Tabela 8	Coefficiente de Correlação de Pearson	54
Tabela 9	Correlação de Pearson para diferentes tamanhos amostrais	55
Tabela 10	Coefficiente de Determinação (R ²) para diferentes tamanhos amostrais	55
Tabela 11	Valores de RMSE (m) para totalidade da área de estudo (Belo Horizonte) ...	55
Tabela 12	Tabela da distribuição de frequências dos resíduos entre ASTER GDEM v2/ SRTM v3/ TOPODATA e o modelo de referência	56
Tabela 13	Tabela da distribuição dos resíduos entre SRTM v2 e o modelo de referência	58
Tabela 14	Avaliação dos modelos segundo o PEC	59
Tabela 15	Escalas de mapeamento e equidistância entre curvas de níveis	60
Tabela 16	RMSE (m) para cobertura do solo do tipo água	68
Tabela 17	RMSE (m) para cobertura do solo tipo terreno aberto	70
Tabela 18	RMSE (m) para cobertura do solo do tipo urbana unifamiliar	72
Tabela 19	RMSE (m) para cobertura do solo tipo urbana verticalizada	73
Tabela 20	RMSE (m) para cobertura do solo do tipo vegetação	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
APP	Área de Proteção Permanente
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EM	Erro Médio
EMQ	Erro Médio Quadrático
EP	Erro Padrão
GCP	Ground Control Points
GDEM	Global Digital Elevation Model
GPS	Global Positioning System
GLIMS	Global Land Ice Measurements From Space
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
MAE	Mean Absolute Error
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
PEC - PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
PRODABEL	Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte
RMSE	Root Mean Square Error

SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
VNIR	Visível e infravermelho próximo
TIR	Infravermelho termal
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Contexto em que se insere a pesquisa	17
1.2 Objetivos	22
1.3 Objetivo principal	22
1.4 Objetivos específicos	22
1.5 Estrutura da pesquisa	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 ASTER GDEM v2	24
2.2 SRTM banda C de resolução espacial de arco de 1 segundo (SRTM v3) e SRTM banda C de resolução espacial de arco de 3 segundos (SRTM v2)	26
2.3 TOPODATA	28
2.4 Relação entre MDEs e declividade	30
2.5 Relação entre MDEs e tipo de cobertura do solo	35
3. METODOLOGIA	40
3.1 Área de estudo	40
3.2 Processamento dos dados	41
3.3 Relacionando dados avaliados, dado de referência e declividade do terreno	43
3.4 Relacionando dados avaliados, dados de referência e tipos de cobertura do solo	46
3.5 Análises Estatísticas	47
3.6 Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Supervisão dos MDEs e Metadados	50
4.2 Histogramas e Estatísticas Descritivas	52
4.3 Correlação, Regressão Linear e RMSE	54

4.4	Análise da Distribuição Estatística da Frequência dos Erros	55
4.5	PEC – PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Digitais)	58
4.6	Relação entre Erros Altimétricos em MDEs e a Declividade do Terreno	60
4.7	Relação entre Erros Altimétricos em MDEs e o Tipo de Cobertura do Solo	63
4.7.1	Água	66
4.7.2	Terreno Aberto	69
4.7.3	Urbana Unifamiliar	71
4.7.4	Urbana Verticalizada	72
4.7.5	Vegetação	75
4.8	Análise Espacial dos Erros	78
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo, conceitua os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), exemplifica com aplicações, apresenta os MDEs que foram avaliados, destaca a importância de conhecer a precisão altimétrica dos MDEs, introduz as variáveis que ocasionam erros na representação da elevação registrada, aborda os métodos mais empregados nas avaliações da precisão altimétrica, bem como descreve os objetivos da pesquisa.

1.1 Contexto em que se insere a pesquisa

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são uma importante forma de representação das variações altimétricas da superfície da Terra. Segundo Burrough (1986), um MDE pode ser utilizado para modelar qualquer atributo z que tenha distribuição contínua na superfície da Terra. No entanto, seu uso mais comum está na modelagem do relevo topográfico. Quando se trata de MDE de representação da altitude, os termos MDS e MDT também são empregados. O MDS é uma descrição geométrica da superfície do terreno e dos objetos localizados acima dessa superfície, tais como árvores e edifícios (HAALA e BRENNER, 1998; BADOLATO, 2014; BEHRENDT, 2012). Já o MDT representa o terreno sem a presença de elementos como vegetação ou edificações (BADOLATO, 2014; BEHRENDT, 2012), ou seja, os MDS e MDT são termos distintos entre si, mas ambos são considerados MDE. Por uma questão de padronização de termos entre publicações de pesquisas e em consonância com a terminologia adotada pelos provedores de dados espaciais, ao longo deste trabalho será utilizado o termo MDE para se referir a dados que por natureza são considerados MDS e, ao se referir a MDTs, o próprio termo MDT será utilizado.

Um dos pioneiros na produção de dados digitais de elevação é o Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS). A produção de dados de elevação pelo USGS começou em 1970, com o desenvolvimento de programas de manipulação de ortofotos. A evolução dos MDE acompanhou o desenvolvimento do sensoriamento remoto, após o lançamento do LANDSAT 1, e os MDEs passaram a ser utilizados em conjunto com as imagens orbitais, dando origem aos SIGs (Sistemas de Informação Geográficas). No entanto, a capacidade computacional de armazenamento dos dados ainda era um fator limitante para o desenvolvimento dessas tecnologias (ASPIAZÚ, ALVES E VALENTE, 1990). A crescente resolução dos sensores imageadores, aliada as melhorias da disponibilidade de memória e poder

de processamento computacional, viabilizaram a produção de grandes mosaicos de MDEs com níveis de detalhamento antes impraticáveis (BADOLATO, 2014).

Atualmente, MDEs com diferentes resoluções espaciais e distintos modos de aquisição são comercializados ou ofertados de maneira gratuita. Na escolha do MDE a ser utilizado, a escala de representação, os custos de aquisição, a precisão, as características da área de aplicação, assim como os erros advindos do processo de aquisição, devem ser levados em consideração. O mercado oferece MDEs de alta resolução (resolução de até 5 metros), como os oriundos de perfilamento a *laser* aerotransportado, que tornam possível levantamentos de alta precisão em áreas de difícil acesso. Há também MDEs de média resolução (resolução de até 20 metros), tais quais os obtidos por estereoscopia de imagens do sensor HRS lançado a bordo do satélite SPOT-5 e projetado para atuar na obtenção de imagens estereoscópicas para criação de MDEs destinados a viabilizar a produção de imagens ortorretificadas. (EMBRAPA, 2013).

O uso de MDEs gratuitos oriundos de sensoriamento remoto tem sido amplamente discutido. No Brasil, as principais fontes disponíveis são os modelos SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA. Os modelos SRTM foram gerados por interferometria de radar e coletados na banda C e na banda X; o modelo coletado na banda C é disponibilizado com resolução espacial de arco de 1 segundo e de arco de 3 segundos¹; e o modelo coletado na banda X é disponibilizado com resolução espacial de arco de 1 segundo. O modelo ASTER GDEM foi gerado por estereoscopia orbital de imagens de satélite e disponibilizado com resolução espacial de arco de 1 segundo. O modelo TOPODATA foi obtido por derivação dos dados SRTM banda C de arco de 3 segundos em reamostragem para 1 arco de segundo.

As aplicações utilizando esses modelos têm ganhado destaque, e a maior parte das aplicações está concentrada na área de Geociências, principalmente em estudos geomorfológicos. Uma gama de produtos pode ser extraída a partir desses modelos, a saber: mapeamento de Áreas de Proteção Permanente (APPs) em topos de morros (OLIVEIRA, 2015); monitoramento da biomassa florestal (SOLBERG *et al.*, 2010); modelagem hidrológica (LUDWIG e SCHNEIDER, 2006); suscetibilidade de enchentes (BRUBACHER, OLIVEIRA e GUASSELLI, 2011); estimativa de perdas de solo (FORNELOS e NEVES, 2007); auxílio na

¹ Arco de 1 segundo e arco de 3 segundos: Arco de segundo é uma medida de ângulos que representa a distância em latitude ou longitude no sistema esférico de coordenadas. Considera-se a Terra dividida em 360°, onde cada grau contém 60 minutos e cada minuto contém 60 segundos. Dividindo-se 360° por 40.075 km que equivale ao valor aproximado da circunferência da Terra no equador, cada minuto corresponde a aproximadamente 1,85 km. Assim, 1 arco de segundo (ou 1 arcseg ou 1'') equivale a aproximadamente 30 metros, e 3 arcos de segundo (ou 3 arcseg ou 3'') equivalem a aproximadamente 90 metros.

detecção de reativações neotectônicas (FONSECA e CORRÊA, 2011); mapeamento geomorfológico (CAMARGO *et al.*, 2011); classificação das formas do relevo (MANFRÉ, NÓBREGA e QUINTANILHA, 2014); recurso didático em salas de aula (REIS *et al.*, 2005). Esses MDEs também são bastante utilizados na modelagem dinâmica (HUISMAN e BY, 2009), como em Piontekowski (2014) e Benedetti, (2010), que levaram em consideração a variável declividade na criação de seus modelos dinâmicos de simulação.

Os MDEs advindos de sensoriamento remoto possuem limitações particulares devido a uma série de fatores que atuam ao longo de todo o fluxo da informação (VALERIANO e ROSSETTI, 2010). O realismo associado ao modelo é condicionado por fatores relacionados com as características do objeto ou da superfície, com os atributos dos dados primários adquiridos e com o método utilizado para gerar a representação tridimensional (IGEOE, 2005). Para Timbó Elmiro (2008), os erros que afetam com frequência os modelos de elevação são geralmente decorrentes de fatores relacionados à geometria de imageamento, ao processamento dos dados e à topografia do terreno imageado. A declividade, altitude, o ângulo de imageamento e o tipo de cobertura do solo são fatores que afetam a precisão altimétrica dos modelos SRTM (GOROKHOVICH e VOUSTIANIOUK, 2006; LUANA, HOUA e WANG, 2015; LUDWIG e SCHNEIDER, 2006; KOLECKA e KOZAK, 2014). A declividade, a altitude (LUANA, HOUA e WANG, 2015), o baixo número de pares estereoscópicos, tipo de cobertura do solo, ocorrência de nuvens e sombras influenciam a precisão altimétrica do ASTER GDEM (LANG e WELCH, 1999).

Nesse contexto, mais do que aplicar um MDE, é importante que o usuário conheça a incerteza existente no tipo de modelo de elevação escolhido, bem como os fatores que geram essa incerteza. Os MDEs passam, dessa forma, a serem analisados a partir de uma abordagem sistêmica em que variáveis como: o tipo de cobertura do solo, as características topográficas do relevo, a altitude, a rugosidade, o comprimento de onda da banda de coleta, exercem influência nos erros ou acertos do produto final, que é a representação da elevação. Torna-se importante, portanto, o desenvolvimento de estudos que, além de avaliar a precisão altimétrica dos modelos, avaliem os MDEs de forma sistêmica, identificando as variáveis que influenciam a ocorrência desses erros, a fim de identificar potenciais e limitações em um Modelo Digital de Elevação.

A Geoestatística tem importante papel no processo de avaliação altimétrica de dados topográficos digitais. Possibilita calcular o erro em uma amostra espacialmente localizada, através da confrontação com uma amostra de referência. Assim, a altimetria constitui o fenômeno ou a população a ser analisada, e a elevação registrada nos pixels da

imagem são as amostras retiradas dessa população. Cada pixel guarda uma informação altimétrica que representa a média das altitudes encontradas na área representada por um pixel. Em ambiente SIG, esses pixels podem ser convertidos para pontos que guardam os atributos de localização (x,y) e elevação (z), abrindo, dessa forma, um leque de opções de cálculos estatísticos. Dada a natureza contínua da altimetria, um ponto que guarda a informação altimétrica ou um grande conjunto de pontos estará sempre representando uma amostra da realidade altimétrica do terreno, pois, caso contrário, infinitos pontos seriam necessários para representar essa realidade.

Na avaliação de Modelos Digitais de Elevação, é observado que o método mais empregado é o Erro Médio Quadrático (EMQ) ou como também chamado *Root Mean Squared Error* (RMSE), por ser o método de avaliação utilizado nas validações realizadas pelo USGS. O índice de correlação, análise de regressão, análise de variância, estatísticas descritivas, gráficos *box-plot* e de dispersão, perfis topográficos e de subtração de imagens também são comumente empregados. No Brasil, um método geralmente utilizado é a avaliação dos MDEs quanto ao PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica). O emprego de novos métodos de avaliação deve sempre ser valorizado, embora também seja importante a utilização de métodos já consolidados nas avaliações, sobretudo para comparação de resultados entre estudos diferentes. As características da área de estudo também devem ser evidenciadas, pois os resultados obtidos estão relacionados às características físicas da área de aplicação. O tamanho amostral e o dado de referência utilizado são questões fundamentais. Para Oliveira (2015), a utilização de baixa densidade amostral, a exemplo de Merchant (1982), que sugere a utilização de 20 pontos amostrais para aferir a qualidade de um produto cartográfico, não reflete a realidade para avaliações cartográficas entre dados diferentes. No entanto, a Especificação Técnica para Estruturação dos Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV) da Força Terrestre do Brasil não define o tamanho amostral ideal para realizar a validação de dados cartográficos. Quanto à precisão do dado de referência, a norma STANAG 2215 da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), intitulada Avaliação de Mapas Terrestres, Cartas Digitais Aeronáuticas e Dados Topográficos (*Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data*), exige que o produto de referência tenha precisão 5 vezes melhor que a precisão do dado avaliado. Dentre metodologias consistentes para avaliação de MDEs, podem ser citadas as aplicadas em: Ludwig e Schneider (2006), Luana, Houa e Wang (2015), Gorokhovich e Voustianiouk (2006), Hirano, Welch e Lang (2003) e Oliveira (2015).

Apesar de vários trabalhos se dedicarem à avaliação dos MDEs gratuitos, são escassos os estudos como os de Ludwig e Schneider (2006) e Becek (2008), que analisaram a relação entre os erros encontrados e os diferentes tipos de cobertura do solo. Trabalhos como Costa *et al.* (2010) e Kolečka e Kozak (2014) avaliaram os efeitos da vegetação na representação altimétrica do modelo SRTM, Tighe e Chamberlain (2009) avaliaram os efeitos de diferentes tipos de vegetação em dados ASTER GDEM e SRTM. As áreas com grande heterogeneidade de elementos sobre o solo, como áreas com tipos de vegetação diversificados ou áreas urbanas, costumam ser evitadas nas avaliações, todavia foi encontrado de Gamba, Dell'Acqua e Houshmand (2002), que avaliaram o potencial do SRTM para identificação de edifícios. A avaliação de dados SRTM banda C de arco de 1 segundo é também ainda pouco abordada, sobretudo no Brasil, devido à recente disponibilização, em setembro de 2014, um dos primeiros estudos publicados no Brasil é o de Silveira e Silveira (2015). Já a avaliação dos modelos SRTM de arco de 3 segundos, do ASTER GDEM e do TOPODATA, em relação às características topográficas, é mais frequente, podendo ser citados os estudos de Chrysoulakis *et al.* (2011), Dias *et al.* (2011), Fuckner Florenzano e Moraes (2009), Gorokhovich e Voustianiouk (2006), Oliveira (2015) e Luana, Houa e Wang (2015). As regiões montanhosas, por sua vez, são as mais abordadas, podendo ser citados Gupta *et al.* (2014), Pinheiro (2006), Kolečka e Kozak (2014) e Nikolakopoulos *et al.* (2006).

Dentro desse enfoque, este trabalho se propõe a avaliar a precisão altimétrica dos MDEs SRTM banda C de resolução espacial de arco de 3 segundos (SRTM v2), SRTM banda C de resolução espacial de arco de 1 segundo (SRTM v3), ASTER GDEM v2 e TOPODATA. Além disso, será investigada a relação entre os erros observados e as variáveis de influência: classes de declividade do relevo (plano, suave ondulado, ondulado, montanhoso e escarpado) e tipo de cobertura do solo (água, urbana unifamiliar, urbana verticalizada, terreno aberto e vegetação). Como referência, foram utilizados dados provenientes de tecnologia *Light Detection and Ranging* (LIDAR), com precisão altimétrica da ordem de 25 cm. A aplicação ocorreu em uma área urbana densamente povoada (Belo Horizonte – MG). A avaliação levou em consideração aspectos físicos do sensoriamento remoto e utilizou os métodos de análise de histogramas, perfis topográficos, coeficiente de correlação, análise de regressão, RMSE, análise da distribuição estatística e espacial dos erros e Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD do Brasil. Deu-se ênfase aos dados SRTM v3 disponibilizados em setembro de 2014, que constituem uma inovação valiosa para trabalhos em Geociências.

1.2 Objetivos

1.3 Objetivo principal

Avaliar a precisão altimétrica dos Modelos Digitais de Elevação oriundos de sensoriamento remoto e disponibilizados de forma gratuita: SRTM banda C (SRTM v3), ASTER GDEM v2, TOPODATA, todos com resolução espacial de arco de 1 segundo que equivale a aproximadamente 30 metros, e SRTM banda C com resolução espacial de arco de 3 segundos que equivale a aproximadamente 90 metros (SRTM v2).

1.4 Objetivos específicos

- Investigar como os métodos de estereoscopia orbital e interferometria por radar interagem com os alvos terrestres e determinam a elevação da superfície;
- Analisar a distribuição estatística e espacial dos erros altimétricos nos modelos avaliados;
- Analisar a influência das classes de declividade do relevo (plano, suave ondulado, ondulado, montanhoso e escarpado) e tipos de cobertura do solo (água, urbana unifamiliar, urbana verticalizada, terreno aberto e vegetação) na precisão altimétrica dos modelos avaliados.

1.5 Estrutura da pesquisa

A presente pesquisa está estruturada em cinco capítulos.

O capítulo 1, conceitua os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), exemplifica com aplicações, apresenta os MDEs que foram avaliados, aborda a importância de conhecer a precisão altimétrica dos MDEs, introduz variáveis que ocasionam erros na representação da elevação registrada e explana os métodos mais empregados nas avaliações da precisão altimétrica, bem como descreve os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2, apresenta o referencial teórico que norteou a pesquisa. Este capítulo foi subdividido em tópicos que descrevem as características de cada um dos MDEs avaliados; e tópicos que abordam a relação entre precisão altimétrica e variáveis que influenciam a

ocorrência de erros altimétricos em MDEs, além de abordar métodos de avaliação e resultados encontrados em outras pesquisas.

O Capítulo 3, localiza e caracteriza a área de estudo, e descreve os passos metodológicos empregados.

O Capítulo 4, apresenta os resultados obtidos com a metodologia aplicada. Expõe a relação entre os métodos de aquisição dos MDEs e a ocorrência de erros altimétricos. Aponta a precisão altimétrica dos modelos avaliados para área de estudo a partir de diferentes métodos de avaliação, bem como, a precisão altimétrica dos modelos avaliados em diferentes classes de declividade do terreno e em diferentes tipos de cobertura do solo. Espacializa e analisa os erros altimétricos observados nos modelos avaliados.

No Capítulo 5, são feitas as considerações finais em relação à pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, são relacionadas as referências bibliográficas que forneceram o embasamento científico para a construção, desenvolvimento e conclusão da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico que norteou a pesquisa. Está subdividido em tópicos que descrevem as características, métodos de obtenção e disponibilização dos modelos ASTER GDEM, SRTM v2, SRTM v3 e TOPODATA, avaliados nesta pesquisa. Discorre sobre a relação entre precisão altimétrica e as variáveis declividade e tipo de cobertura do solo, que influenciam a ocorrência de erros altimétricos em MDEs. Aborda também métodos de avaliação de MDEs e resultados encontrados em outras pesquisas.

2.1 ASTER GDEM v2

O instrumento Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – ASTER foi lançado a bordo do Satélite Terra em dezembro de 1999. É resultado de um projeto conjunto entre o Ministry of Economy, Trade and Industry – METI e a National Aeronautics and Space Administration – NASA. O ASTER é composto por três subsistemas sensores (Tabela 1), cada um operando em uma região espectral distinta com o seu próprio telescópio. Os subsistemas do ASTER são: o visível e infravermelho próximo (VNIR), que tem três bandas com visão a nadir, com resolução espacial de 15 m e uma banda 3B adicional para formação da estereoscopia com visada para trás (*backward looking*); o infravermelho de ondas curtas (SWIR), que tem 6 bandas com uma resolução espacial de 30 m; e o infravermelho termal (TIR), que tem 5 bandas com uma resolução espacial de 90 m (ABRAMS e HOOK, 1999).

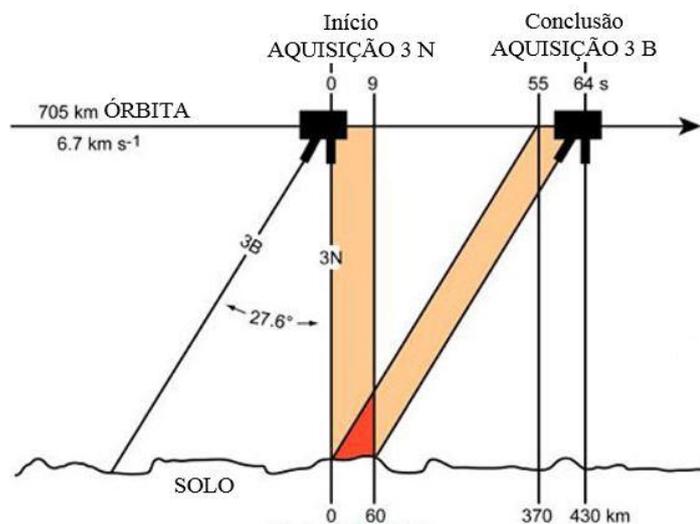
Tabela 1: Características do Instrumento ASTER

Subsistema	Bandas espectrais (μm)	Resolução espacial (m)	Quant. de bandas
VNIR	0,5 – 0,9	15	3 verticais e 1 inclinada
SWIR	1,6 – 2,5	30	6
TIR	8,0 – 12,0	90	5

O subsistema VNIR coleta imagens estereoscópicas usando visão a nadir e off-nadir, possibilitando, assim, a estereoscopia orbital que é a base da construção dos Modelos Globais Digitais de Elevação denominados ASTER GDEM (ABRAMS e HOOK, 1999). A estereoscopia orbital consiste na extração de informações de duas imagens de um mesmo local, adquiridas em ângulos diferentes de imageamento (LANDAU e GUIMARÃES, 2011).

O processo de aquisição dos pares de imagens coletadas pelo instrumento ASTER – sensor VNIR, para geração da estereoscopia orbital é explicado como segue: durante cerca de 9 s, uma imagem de aproximadamente 60 km é adquirida a nadir (vertical) pela banda denominada 3N. 55 segundos depois, uma segunda imagem também de aproximadamente 60 km e durante cerca de 9 s é coletada pela banda denominada 3B (*Backward looking*), gerando uma imagem retro visada em um ângulo de $27,6^\circ$ em direção oposta à órbita do satélite. Esse processo forma o par estereoscópico de imagens para criação de uma cena ASTER GDEM (GLIMS, 2002), conforme ilustração na Figura 1.

Figura 1: Processo de criação de um par estereoscópico de imagens orbitais pelo instrumento ASTER – sensor VNIR.



Fonte: Adaptado de GLIMS (2002)

A identificação de pontos homólogos nas cenas adquiridas, é feita de forma automática através de correlação normalizada. Na versão 1 do ASTER GDEM foram utilizadas janelas de correlação de 9x9 pixels; na versão 2, visando ao melhoramento na resolução horizontal dos dados, o tamanho da janela de correlação foi diminuído para 5x5 pixels. A correlação é caracterizada pelo estabelecimento de correspondência entre duas ou mais imagens digitais, representando parte de uma mesma realidade tridimensional. Quanto maior for a densidade de pontos gerados através da correlação, maior poderá ser o rigor na forma e a precisão numérica do modelo (EQUIPE DE VALIDAÇÃO ASTER GDEM, 2011; IGEOE, 2005).

Os MDE ASTER GDEM cobrem superfícies terrestres entre as latitudes 83° N e 83° S, e é composto por 22.702 cenas, cada cena cobre uma área de 1°x1° (aproximadamente 35 km). A primeira versão (ASTER GDEM v1) foi disponibilizada aos usuários pela NASA e METI a partir de junho de 2009, com precisão global de cerca de 20 metros de precisão vertical e 30 metros de precisão horizontal, a um nível de confiança de 95%. Segundo Lang e Welch (1999), foram detectados erros associados a falhas na correção estereoscópica, relacionados a regiões de alta altitude, incidência de nuvens e problemas no mascaramento de corpos d' água.

A segunda versão (ASTER GDEM v2) foi disponibilizada aos usuários pela NASA e METI a partir de outubro de 2011 e apresenta melhorias substanciais em relação a versão 1, que incluem maior precisão horizontal e vertical, e valores mais realistas para os corpos hídricos. Estas melhorias se devem principalmente ao aumento no número de pares estereoscópios adquiridos e a refinamentos no algoritmo de produção dos modelos. (EQUIPE DE VALIDAÇÃO ASTER GDEM, 2011).

Os MDEs ASTER GDEM versão 2 são disponibilizados on-line e gratuitamente pelo USGS com resolução espacial de arco de 1 segundo (aproximadamente 30 metros), e podem ser baixados através do site <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> mediante cadastro do usuário. Ao realizar o *download*, o usuário tem acesso a um arquivo comprimido zip, contendo o MDE e um arquivo de avaliação de qualidade do MDE, ambos os arquivos tem a mesma dimensão.

2.2 SRTM banda C de resolução espacial de arco de 1 segundo (SRTM v3) e SRTM banda C de resolução espacial de arco de 3 segundos (SRTM v2)

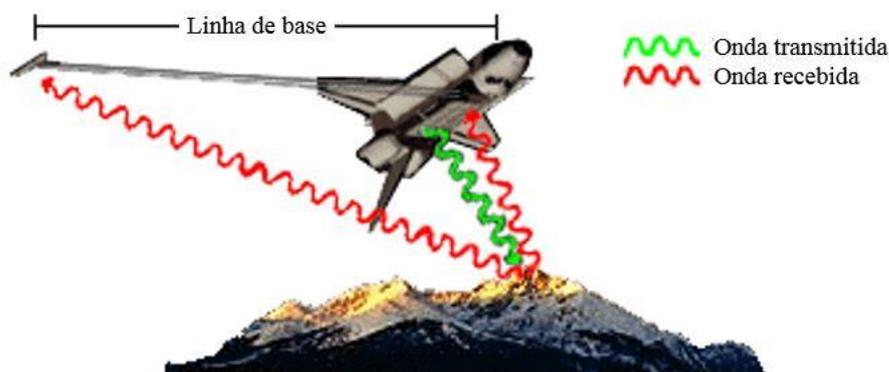
O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) é projeto conjunto entre a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e as Agências Espaciais Alemã e Italiana, que teve por objetivo produzir dados topográficos digitais de 80% da superfície terrestre cobrindo as áreas terrestres localizadas entre as latitudes 60° N e 56° S. A missão SRTM foi realizada por ocasião do lançamento do ônibus espacial *Endeavour*, com uma tripulação de seis pessoas, a partir do Centro Espacial Kennedy, em 11 de fevereiro 2000 (FARR *et al.*, 2007). O *Endeavour* orbitou a Terra 16 vezes por dia, durante a missão de 11 dias, completando 176 órbitas (USGS, 2015).

O princípio de coleta dos MDEs oriundos da missão SRTM é fundamentado pela interferometria de radar, que tem por objetivo medir a diferença no intervalo entre duas

observações de um determinado ponto do solo, com precisão suficiente para permitir uma recomposição topográfica (FARR *et al.*, 2007).

O sistema de captação dos dados SRTM por interferometria de radar é explicado como segue: a antena principal localizada no compartimento de carga do ônibus espacial iluminava uma parte da superfície da Terra. Mas, em vez de usar os raios de luz, transmitia um feixe de ondas de radar. Quando as ondas de radar atingiam a superfície da Terra, os raios eram espalhados em várias direções, e esse espalhamento dependia da rugosidade da superfície. Essas ondas dispersas eram recolhidas pelas duas antenas SRTM. A diferença da linha de base entre a antena principal e a antena acoplada ao mastro de 60 metros é conhecida e permanece constante. O que muda é a distância das duas antenas em relação à superfície da Terra. Através da utilização da informação sobre a distância entre as duas antenas e as diferenças entre os sinais de ondas de radar refletidos, é que a elevação da superfície da Terra pode ser calculada (USGS, 2008), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Esquema de funcionamento de transmissão e recebimento das ondas de radar na missão SRTM.



Fonte: Adaptado de USGS (2008)

A missão utilizou dois radares de abertura sintética, o sistema de banda C, com comprimento de onda igual a 5,6 cm, e o sistema de banda X, com comprimento de onda igual a 3,1 cm. O responsável pela banda C foi o Jet Propulsion Laboratory da NASA e o responsável pela banda X foi a German Aerospace Center.

O download dos dados SRTM banda C podem ser realizados através do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS, pela interface *Earth Explorer*; e dos dados SRTM banda X podem ser realizados através do site do *Earth Observation Center* - EOWeb da *German Aerospace Center* (DLR).

Os produtos disponibilizados pelo USGS são: MDE SRTM Non-Void Filled (SRTM v1) de resolução espacial de arco de 3 segundos (aproximadamente 90 metros), coletados na banda C; MDE SRTM Void Filled (SRTM v2) de resolução espacial de arco de 3 segundos, oriundos da banda C e disponibilizados a partir de 2012 com a maioria dos vazios de informação altimétrica existentes no SRTM v1 já preenchidos, esses preenchimentos foram feitos através da utilização de algoritmos de interpolação em conjunto com outras fontes de dados de elevação, dentre essas o ASTER GDEM (USGS, 2015); também é disponibilizado o MDE SRTM v3 de resolução espacial de arco de 1 segundo (aproximadamente 30 metros) coletado na banda C, e disponibilizado para a América do Sul a partir de setembro de 2014, esta versão antes estava disponível apenas para o território dos Estados Unidos. Algumas cenas do SRTM v3, assim como SRTM v1 e SRTM v2, podem conter espaços com vazios de informação altimétrica.

A SRTM representa uma nova classe de missões em teledetecção, foi a primeira implementação de origem interferométrica de passagem única no espaço. Em dez dias, a missão SRTM mapeou algumas das regiões menos acessíveis do mundo, independente da hora do dia e do clima. A missão conseguiu o que a cartografia convencional não havia conseguido atingir em três séculos de sua existência (FARR *et al.*, 2007).

Para Timbó Elmiro *et al.* (2006), modelos de elevação produzidos por interferometria de radar tendem a apresentar erros localizados e recomenda a existência de fases intermediárias de avaliação de correção de erros antes de sua utilização em aplicações.

2.3 TOPODATA

O projeto TOPODATA oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM v1 disponibilizados pelo USGS na rede mundial de computadores (INPE, 2008).

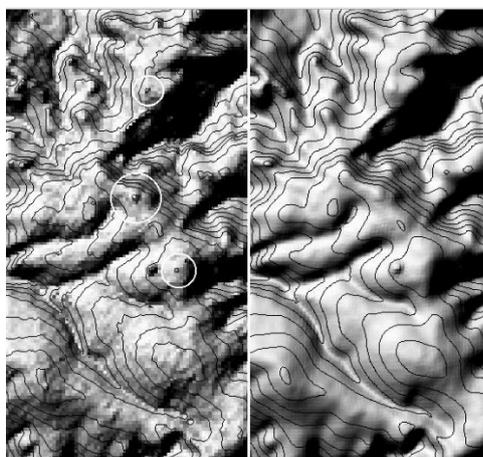
A preparação dos dados consistiu na modificação do MDE SRTM original (SRTM banda C Non-Void Filled) para um novo MDE, com características desejáveis. Para tanto, foram utilizados métodos de interpolação baseados em Krigagem, que pode ser definida como um interpolador cuja variabilidade espacial dos dados condiciona a função que relaciona os pesos das amostras às suas distâncias (VALERIANO; ROSSETTI, 2010). A capacidade da Krigagem de trabalhar com as componentes da variabilidade espacial torna possível o manuseio de variações espacialmente aleatórias, como as que são causadas por erros, objetos sobre o

terreno e feições detalhadas, ao passo que favorece o ajuste do MDE a realidade do terreno. No entanto, a inclusão da aleatoriedade nas interpolações por krigagem pode causar perda de exatidão altimétrica nos talwegues e divisores de água, com a redução da altura, ou amplitude, do relevo (VALERIANO, 2004).

Entre as modificações pretendidas com o Projeto TOPODATA, listam-se: a resolução melhorada para arco de 1 segundo (aproximadamente 30 m), a remoção de falhas e distribuição da aleatoriedade (VALERIANO, 2005). Neste projeto foram obtidas também variáveis morfométricas, tais como declividade, curvatura vertical e horizontal, comprimento de rampa e orientação de vertentes a partir do modelo interpolado por krigagem (VALERIANO, 2004).

A mudança da resolução de arco 3 segundos para arco de 1 segundo por krigagem reduziu efeitos indesejáveis de objetos sobre o terreno, favorecendo a geração de curvas de nível, a extração digital de variáveis topográficas e a definição de feições de drenagem relativamente detalhadas (VALERIANO, 2005), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Relevo sombreado de modelos de elevação gerados com dados SRTM banda C e TOPODATA tratados com krigagem.



Fonte: Valeriano (2005)

A primeira versão do TOPODATA foi publicada em 2008 e a última versão em 2011. Os dados TOPODATA são distribuídos pelo INPE, o *download* pode ser realizado para todo o território brasileiro no formato das folhas de mapas nacionais 1:250.000, de 1° de latitude por 1,5° de longitude através do link <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>> (INPE, 2008).

Os dados TOPODATA atendem: a usuários que podem utilizar os dados morfométricos disponibilizados diretamente do banco de dados, sem que seja necessário o

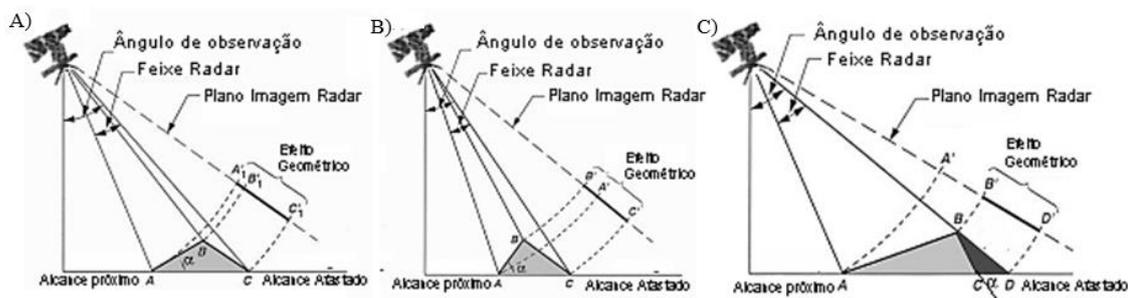
domínio de nenhuma das etapas que precedem a obtenção destas variáveis; a usuários que podem aplicar os modelos preparados para gerar suas próprias variáveis morfométricas; a usuários que querem fazer uso dos dados SRTM originais. A disponibilização dos dados SRTM originais é também um componente de segurança para a possibilidade de interrupção da oferta destes dados pelo USGS (VALERIANO, 2004).

2.4 Relação entre MDEs e declividade

Rebelo (2007) discute as distorções de escala e distorções geométricas ocasionadas pela geometria de imageamento dos radares, como é o caso do SRTM. Estas distorções estão também relacionadas às características topográficas. As distorções de escala acontecem porque os radares medem a distância em direção oblíqua alterando a verdadeira dimensão dos objetos, de modo que os objetos mais próximos do alcance do feixe de radar aparecem comprimidos, e os mais distantes se aproximam mais da dimensão real. As distorções geométricas estão relacionadas a relevos com grandes declives e ao ângulo de incidência do sensor imageador. As distorções geométricas podem causar: efeitos de compressão, quando o ângulo de incidência é maior que a inclinação do terreno; efeito de inversão, quando o ângulo de inclinação é menor do que a inclinação do terreno; e efeito sombra, quando regiões localizadas na parte de trás de montanhas (atrás em relação ao sensor) não são iluminadas.

Nas regiões em que ocorre o efeito sombra, o sensor de radar não consegue representar a elevação. Esses vazios de representação, no caso dos dados SRTM, são chamados de *voids* pelos produtores dos dados. Por este motivo a denominação SRTM *non-void filled* para o SRTM v1 e SRTM *void filled* para o SRTM v2, ou seja, dados SRTM com ou sem o preenchimento de espaços vazios em locais onde o sensor de radar não recebeu sinal de retorno suficiente para registrar a elevação. Na secção 2.5, veremos que esses *voids* ou vazios também são comuns em superfícies com baixa rugosidade. As distorções geométricas estão ilustradas na Figura 4.

Figura 4: Distorções geométricas em imagens de radar. A) Efeito de compressão; B) Efeito de inversão; C) Efeito sombra



Fonte: Rebelo (2007)

Gorokhovich e Voustianiouk (2006) apontam que a precisão altimétrica dos dados SRTM da banda C de arco de 3 segundos é afetada a partir de declividades maiores que 10° . Neste trabalho, as ocorrências dos erros em áreas geograficamente independentes e com diferentes características de declividade foram avaliadas a partir da confrontação com dados GPS de alta precisão. As análises estatísticas empregadas incluíram estatísticas descritivas e análise de regressão linear. As diferenças entre os valores dos dados GPS e dos dados SRTM variaram entre 3.83 m e 5.03 m para área com declividade menor ou igual a 10° , e entre 12.37 m e 19.20 m para área com declividade superior a 10° . Tighe e Chamberlain (2009) também encontram erros maiores para terrenos com declividades acima de 10° , nesse caso para os dados SRTM e ASTER GDEM. O SRTM de 1 de segundo apresentou RMSE de 16,49 m para áreas com declividade menor que 10° e RMSE de 21,38 m para declividades maiores que 10° ; para o ASTER GDEM foram encontrados RMSE de 12,91 m para áreas com declividade menor que 10° e RMSE de 24,08 m para declividades maiores que 10° .

Pinheiro (2006) avaliou a precisão altimétrica do MDE SRTM de arco de 3 segundos e MDE gerado com pontos cotados obtidos de cartas topográficas na escala de 1:50.000 disponibilizadas pela DSG (Diretoria de Serviços Geográficos), para uma área de relevo escarpado, com declividade que varia de 15° a 45° . Foram utilizados como referência pontos coletados com GPS geodésico. Foram empregadas, para comparação, estatísticas descritivas, gráficos *box-plot* e EMQ (Erro Médio Quadrático). Foi encontrado que o SRTM apresentou EMQ menor do que o MDE gerado a partir de cartas topográficas, e o estudo atribuiu esse resultado a possíveis falhas relacionadas à precisão do levantamento altimétrico para criação de cartas topográficas, gerado a partir de levantamentos fotogramétricos com tecnologia de 1975. O trabalho também identificou que o SRTM apresentou erros constantes em planaltos e em vales (EMQ em torno de 7 m); no entanto, neste estudo não foram utilizadas áreas

geograficamente independentes, como em Gorokhovich e Voustianiouk (2006). Além disso, em áreas planas com maiores dimensões, os resultados poderiam ter sido diferentes.

Gupta *et al.* (2014) avaliaram dados SRTM banda X de resolução espacial de arco de 1 segundo em relação a MDE de precisão vertical de 1,60 metros, obtidos através de levantamento aerofotogramétrico. A área de aplicação está localizada nas montanhas do Himalaia, e possui declives de até 83°. Os modelos foram reamostrados para mesma resolução (30 m) e registrados através do modelo de referência; após o registro, foram encontrados RMSE de 6.90 m em X e 4.34 m em Y. Foram identificados grandes vazios de representação altimétrica nos dados SRTM, por ser uma área muito montanhosa e, para comparação justa entre os dados, os espaços vazios contidos no SRTM foram omitidos no MDE de referência. Estatísticas descritivas geradas a partir dos escores obtidos entre a subtração do MDE SRTM pelo modelo de referência demonstraram subestimação do SRTM em relação à referência. O RMSE obtido foi de 73,36 m, valor bem mais alto do que o indicado pelas avaliações de precisão realizadas pelos produtores dos dados, que é de 16 metros. Os autores recomendam, dessa forma, cuidado ao utilizar dados SRTM para representação de regiões montanhosas do Himalaia.

Chrysoulakis *et al.* (2011) desenvolveram uma série de avaliações dos dados ASTER GDEM para o território da Grécia. Foram realizadas análises dos histogramas dos modelos avaliados e dos modelos de referência. Os testes estatísticos utilizados foram RMSE (*Root-mean-square-error*), MAE (*Mean absolute error*), MedAE (*Median absolute error*) e os índices de correlação de Pearson's e Spearman's. Foi identificada forte correção linear entre o ASTER GDEM e as referências em todas as comparações realizadas. As avaliações foram feitas mediante comparações contra modelos produzidos pelo projeto denominado REALDEM (CHRYSOULAKIS *et al.*, 2004), produzido a partir de cenas ASTER e de pontos de controle de solo, para uma área urbana – Atenas (RMSE=21,21 m) e para uma área rural – localizada no município de Heraklion, na Ilha de Creta (RMSE=11,93 m); contra MDE de precisão vertical de 2 m obtido por aerofotogrametria para área do município de Rodes (RMSE = 13,93 m); contra levantamentos realizados com GPS geodésico para uma área localizada na ilha de Creta (RMSE=11,08 m). Também foi realizada validação para todo o território grego através de 5000 pontos de controle de solo (RMSE=16,01 m). Com a demonstração espacial dos erros foi observado que os erros encontrados foram maiores em áreas de maior declividade. Foi ressaltado que, dentre as áreas independentes analisadas, a área urbana foi a que apresentou os maiores erros.

Ludwig e Schneider (2006) avaliaram dados SRTM coletados na banda X de resolução espacial de arco de 1 segundo para uma área com relevo suave, reportando os erros menores (RMSE = 9,85 m), e uma área com relevo montanhoso, onde foram identificados os erros maiores (RMSE = 22,96 m). Os autores relacionaram esse resultado ao efeito sombra do radar, ocorridos durante o processo de imageamento.

Nikolakopoulos *et al.* (2006) avaliaram a precisão horizontal e vertical de dados ASTER e SRTM de resolução espacial de arco de 3 segundos para duas regiões montanhosas localizadas na Grécia. Foram utilizados como referência modelos produzidos pelo projeto denominado REALDEM, (CHRYSOULAKIS *et al.*, 2004), produzido a partir de cenas ASTER e de pontos de controle de solo levantados com GPS geodésico. Os autores perceberam um grande desalinhamento entre o ASTER REALDEM e o MDE SRTM (aproximadamente 200 metros a leste e 400 metros a norte), provavelmente devido às máscaras aplicadas as duas áreas para distinguir terra e oceano nos dados SRTM (as áreas de estudo estão localizadas em uma ilha). Para corrigir esses desalinhamentos, o SRTM foi registrado a partir do MDE ASTER REALDEM; após o registro dos histogramas de subtração dos MDEs, a média das diferenças das elevações para duas áreas foram de 7,82 m e 2,36 m, e os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman indicaram alta correlação entre eles.

Luana, Houa e Wang (2015) avaliaram a precisão vertical dos MDEs SRTM de resolução espacial de arco de 3 segundos, ASTER GDEM versão 1 e ASTER GDEM versão 2, em função da declividade e altitude. Os dados de elevação de referência foram derivados de aerofotos com precisão vertical estimada em 2,5 metros. Os métodos estatísticos utilizados para comparação foram desvio padrão, *Mean Absolute Error* (MAE) e RMSE. Para quantificar a relação entre erros, declividade e altitudes, foi utilizada análise de regressão. A regressão linear identificou correlação linear significativa entre os modelos avaliados e o dado de referência (SRTM: 0,991; GDEMv1: 0,966; GDEMv2: 0,988). Os RMSE encontrados foram: SRTM de arco de 3 segundos: 13,74 m; ASTER versão 1: 24,11 m; ASTER versão 2: 12,12 m. Nos dados SRTM, a declividade explicou 70,2% dos erros de elevação e a altitude explicou 59,2% dos erros. Nos dados ASTER versão 1, a declividade explicou 64,8% e a altitude 44,6%. No entanto, nos dados ASTER versão 2, a declividade e a elevação tiveram pouco poder explicativo.

Os dados TOPODATA, uma vez obtidos por derivação de dados SRTM banda C de arco de 3 segundos também são influenciados pela declividade. Todavia, segundo Landau e Guimarães (2011), o TOPODATA em relação ao ASTER GDEM e SRTM banda C de arco de 3 segundos apresenta certo melhoramento no que tange à representação de áreas onde o relevo

é mais acidentado, apresentando, porém, limitações relacionadas com a delimitação de áreas costeiras e identificação de variações do relevo em áreas pouco onduladas.

No estudo de Oliveira (2015), os MDEs ASTER GDEM, SRTM banda C de resolução espacial de arco de 3 segundos, TOPODATA e também MDE gerado a partir de Cartas Topográficas, foram confrontados com dados LIDAR e avaliados quanto à sua precisão altimétrica. Foram utilizados os métodos Root Mean Square Error (RMSE), Erro Médio (EM), Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e perfis topográficos. Segundo Oliveira (2015), em se tratando de declividade, há particularidades entre ASTER e SRTM. Em regiões de relevo plano, os dados SRTM se mostraram mais precisos que o ASTER GDEM; esse, por sua vez, é menos influenciado pela declividade do terreno. Nas regiões de relevo montanhoso, o ASTER GDEM apresentou maior precisão em relação ao SRTM.

Dias *et al.* (2011) avaliaram dados SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA em regiões com diferentes configurações topográficas (região amazônica e uma região em Petrópolis – RJ). O método de avaliação utilizado foi o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Erro médio quadrático (EMQ). Para avaliação em regiões planas, as referências utilizadas foram pontos coletados com GPS geodésico. Para Petrópolis, foram utilizados pontos obtidos a partir de carta topográfica na escala de 1: 10.000. Na região Amazônica, o SRTM apresentou o menor EMQ; todos os modelos atenderam à escala 1: 100.000 na classe A, e nenhum dos modelos atendeu à escala 1: 50.000 na classe C. Na região de Petrópolis, o TOPODATA apresentou o menor EMQ, e todos os modelos foram compatíveis com a escala 1: 100.000 na classe A; na escala de 1:50000, os modelos TOPODATA e ASTER conseguiram se classificar na classe B e classe C, respectivamente. Segundo os autores, os MDEs apresentaram melhores resultados para a região de Petrópolis. O esperado seria a região amazônica apresentar melhores resultados, tendo em vista que essa é uma região com relevos mais planos, e a região de Petrópolis é uma região montanhosa. Faltou investigação do que pode ter levado a esses resultados; fatores como o tipo de cobertura do solo das áreas de aplicações podem ter influência, além de a referência utilizada constituir em MDT que representa o solo e não em MDS, que representada a superfície, como no caso do SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA.

2.5 Relação entre MDEs e tipo de cobertura do solo

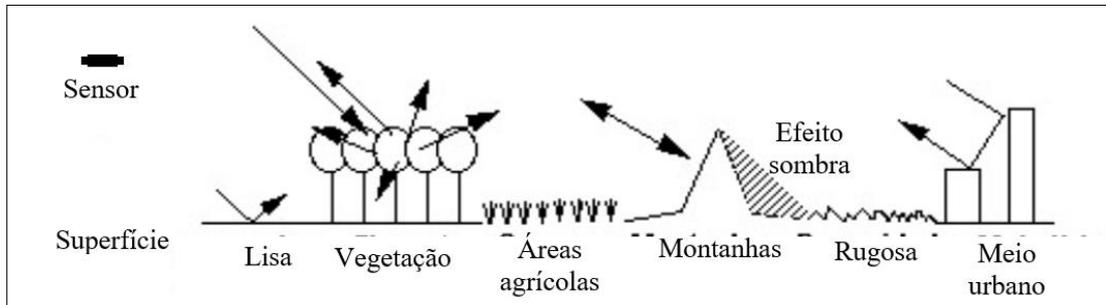
Tem-se observado nos trabalhos de avaliação altimétrica de dados ASTER GDEM e SRTM que as áreas de estudo selecionadas para as aplicações dos testes apresentam características homogêneas; costumam ser evitadas áreas com presença de vegetação diversificada ou com presença de edificações, uma vez que esses elementos podem interferir na precisão altimétrica dos MDEs. Gorokhovich e Voustianiouk (2006) utilizaram áreas de estudo com coberturas vegetais uniformes em altura e densidade, com objetivo de não interferir nas avaliações descritas sobre os dados SRTM. Chrysoulakis *et al.* (2011) validaram MDE ASTER GDEM para áreas urbanas, mas não analisaram como os diferentes elementos que compõem cidades podem interferir na precisão altimétrica.

Farr *et al.* (2007) relatam que nem sempre o SRTM mapeia a superfície da terra. Se o sinal incidiu sobre o um solo exposto, será representada a superfície. Se o solo era coberto por vegetação, o sinal de retorno foi influenciado pela vegetação, a estrutura e a densidade das árvores. Se a vegetação era muito densa, pouco ou nenhum sinal pode ter retornado a partir do solo. Superfícies lisas, como a água calma e lençóis de areia lisa, podem não espalhar energia suficiente de volta na direção do sensor e, portanto, podem não produzir uma medida da altura. Objetos construídos pelo homem, tais como grandes edifícios, estradas, torres e pontes são alvos frequentes de erros nas imagens de radar; a dimensão de um prédio, por exemplo, se menor que 30 ou 90 m de acordo com imagem, interferirá na altura atribuída ao pixel em que este prédio está localizado, uma vez que SRTM representa a altura média das elevações existentes sobre a superfície.

A rugosidade da superfície influencia diretamente a representação da elevação em dados de radar, uma vez que o radar capta a energia na direção do retroespalhamento, ou seja, a energia que volta na direção do sensor. A retroreflexão está relacionada ao valor de intensidade ou valor radiométrico representado nos pixels das imagens de radar. Superfícies com muita rugosidade, como as áreas urbanas, aparecem como zonas claras nas imagens, pois esse tipo de superfície reflete o sinal recebido em todas as direções, inclusive na direção do sensor de radar. Já superfícies com baixa rugosidade, como superfícies de lagos ou áridas, emitem o sinal recebido da direção do espalhamento, não retornando energia na direção do sensor; essas áreas aparecem em preto nas imagens e correspondem a áreas em que o sensor não recebeu energia suficiente em sua direção para produzir elevações (REBELO, 2007). Na Figura 5, são demonstrados como os feixes de radar se comportam em diferentes tipos de

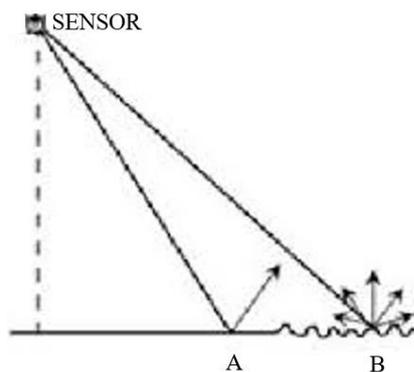
superfície. Na Figura 6, é demonstrado como acontece a reflexão dos feixes de radar em superfícies com baixa e alta rugosidade.

Figura 5: Mecanismos de retroflexão do sinal de radar em diferentes tipos de superfície.



Fonte: Adaptado de Rebelo (2007)

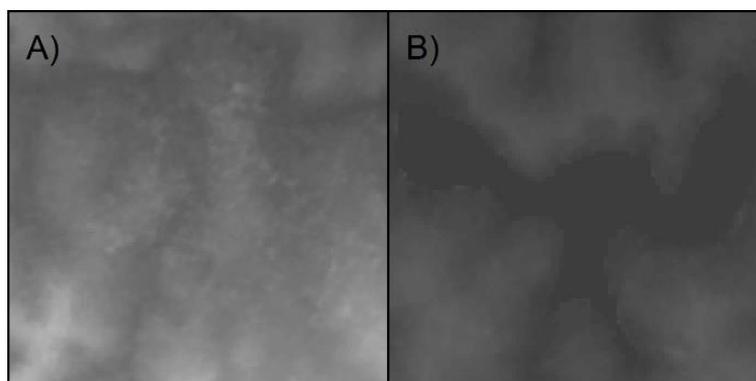
Figura 6: Reflexão em superfícies lisas (A) e em superfícies rugosas (B)



Fonte: Adaptado de Rebelo (2007)

Na Figura 7, as imagens A e B do SRTM de resolução espacial de arco de 1 segundo receberam o mesmo tipo de contraste. A imagem “A” exemplifica as tonalidades claras encontradas em superfícies com alta rugosidade (no caso ilustrado, a região do centro de Belo Horizonte); a imagem “B” exemplifica as tonalidades escuras encontradas em superfícies com baixa rugosidade, onde é possível observar em tons mais escuros os delineamentos da Lagoa da Pampulha.

Figura 7: A) Tonalidades mais claras, superfícies rugosas, maior retroespalhamento; B) Tonalidades mais escuras, superfícies lisas, menor retroespalhamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2017)

Ludwig e Schneider (2006) avaliaram a precisão altimétrica do MDE SRTM banda X de arco de 1 segundo, para uma área plana e uma área montanhosa situadas na Alemanha, em relação a diferentes tipos de cobertura do solo. Na área plana, foram definidas as classes de cobertura: áreas urbanas, áreas agrícolas e florestas; e na área montanhosa, foram definidas as classes: áreas urbanas, áreas agrícolas, floresta, arbustos, espaço aberto, zonas húmidas e água. Segundo os autores, era esperado que o SRTM apresentasse alguma variação em diferentes tipos de cobertura solo, tendo em vista que o sinal refletido nas imagens de radar depende das propriedades de dispersão dos objetos sobre a superfície, além do ângulo de incidência local e da topografia. Foram calculadas estatísticas básicas a partir da subtração de imagens para cada classe de cobertura. Para a área montanhosa, foram observadas diferenças menores que um metro; para as classes áreas urbanas, áreas agrícolas e zonas húmidas e para as classes água e arbustos, foram encontradas maiores discrepâncias (1,5 m e -2,5 m respectivamente). No entanto, os autores ressaltam que o bom resultado encontrado para a área classificada como urbana pode estar relacionado à caracterização da área, que é composta mais por grandes habitações horizontais do que por altos edifícios. Para a área plana, as classes urbana e agrícola apresentaram pronunciadas discrepâncias negativas (-2,7 m e -3,87 m, respectivamente). Tanto na área plana, como na área montanhosa, a classe floresta apresentou os maiores erros médios (18,2 m e 11,3 m respectivamente); a classe de terreno aberto definida na região montanhosa apresentou o maior erro (24 m) e, segundo os autores, era esperado que essa classe apresentasse erros menores, mas com uma análise mais profunda foi observado que a maior parte das áreas definidas como terreno aberto estavam associadas a áreas localizadas em encostas, estando esse erro, então, associado à declividade e não à proposta inicial que era o tipo de cobertura do solo.

Costa *et al.* (2010) validaram dados SRTM de arco de 3 segundos em uma região localizada no semiárido cearense, com vegetação de porte baixo predominante (erro médio encontrado de 7,7 m para área total). Para comparação, foram utilizadas Referências de Nível (RN) homologadas pelo IBGE. Os métodos utilizados foram Análise de Variância (ANOVA), Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Erro Médio Quadrático (EMQ). As elevações referentes ao SRTM e as referências de nível do IBGE foram confrontadas para diferentes classes de vegetação, foram consideradas vegetação de 3, 4, 5 e 6 metros de altura. Foi observada a influência da vegetação na precisão altimétrica do MDE SRTM. A classe de vegetação com maior porte apresenta menor precisão, com erro médio de 14,0 m; e a vegetação de menor porte apresentou erro em torno de 1,8 m. Para a região semiárida, os dados SRTM se enquadram nas categorias A (vegetação de 3 a 4 metros) e classe B (vegetação de 5 m) do Padrão de Exatidão Cartográfica na escala de 1:100.000. Somente a vegetação de matas úmidas, com altura de 6,0 m, não atendeu a nenhuma categoria do PEC. Tighe e Chamberlain (2009) identificaram que, com o aumento da vegetação, aumentam os erros nos dados SRTM de arco de 1 segundo e ASTER GDEM. Kolecka e Kozak (2014), que avaliaram a precisão do MDE SRTM banda C de arco de 3 segundos em áreas florestadas e não florestadas em uma região montanhosa, observaram erros maiores nas áreas florestadas (RMSE = 12.97 m) e erros menores nas áreas não florestadas (RMSE = 9.61 m). Valeriano (2004) identificou, em imagens SRTM de arco de 3 segundos, áreas desmatadas através do desnível de superfícies em meio a áreas florestadas.

Gamba, Dell'Acqua e Houshmand (2002) identificaram altos edifícios em imagens SRTM. Segundo este trabalho, o SRTM apresenta sensibilidade a feições antrópicas de expressão topográfica, tais como cortes e aterros de estradas e edificações presentes em áreas urbanas.

Além do tipo de cobertura do solo e características do relevo, o comprimento de onda e a penetrabilidade nos alvos é um fator importante a ser discutindo. O comprimento de onda estabelece o grau de infiltração dos impulsos radar sobre os diferentes tipos de superfície (REBELO, 2007). Becek (2008) analisou a impenetrabilidade de diferentes coberturas do solo (vegetação, urbano, agricultura e água) nos dados SRTM banda C de arco de 3 segundos e SRTM banda X de arco de 1 segundo. Utilizou subtração de imagem e analisou a média e desvio padrão dos escores obtidos com essa operação. No entanto, não chegou a resultados precisos, e as coberturas vegetação, urbano, agricultura e água se comportaram de forma semelhante, de modo que os desvios padrões variaram entre 2.79 m para agricultura e 6.88 m para árvores.

Foram encontrados ainda indícios de que o SRTM banda X (comprimento de onda igual a 3 cm) penetra na vegetação mais que o SRTM banda C (comprimento de onda igual a 5,6). No entanto, considerando Timbó Elmiro (2008) e Santos *et al.* (2004), comprimentos de ondas maiores têm maior penetração sobre os alvos terrestres. A conclusão de Becek (2008) pode estar relacionada à maior resolução do MDE da banda X (1 arco de segundo ou aproximadamente 30 m) em relação ao MDE da banda C (3 arcos de segundo ou aproximadamente 90 m).

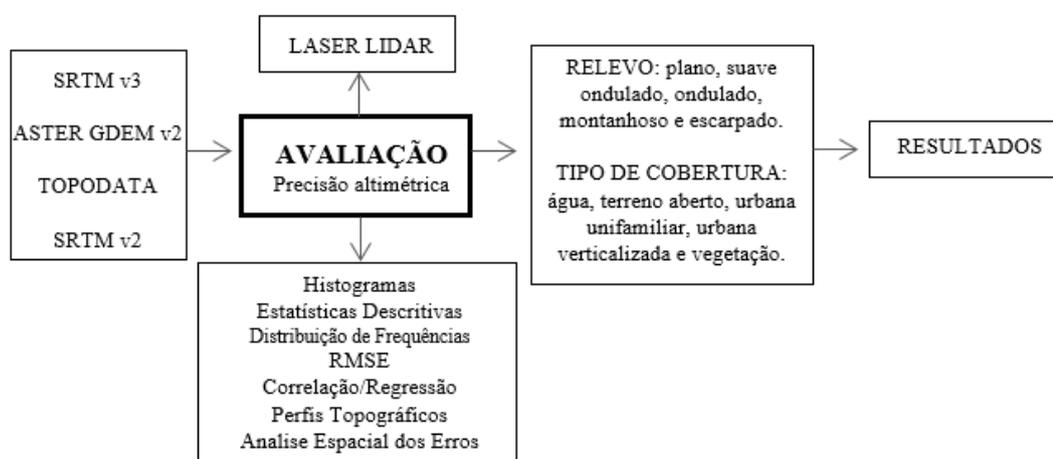
Em Timbó Elmiro (2006), foi proposto um método de correção por translação em altitude para imagens geradas por interferometria de radar. A área investigada está inserida na Floresta Nacional do Tapajós. O método apresentou resultados satisfatórios, e a aproximação com o dado de referência foi constatada principalmente para áreas desmatadas. A qualidade da correção e o controle dos ruídos foram monitorados em termos de análise dos desvios padrão, máximos e mínimos. Além disso, foi analisada a penetrabilidade das ondas de radar. Foram consideradas as bandas P e X obtidas com o sistema Radar aerotransportado e banda C obtida de imagens SRTM. Foi identificado que a penetrabilidade da banda P no solo pode ser influenciada pelo tipo de vegetação encontrada: quanto mais densa a floresta, mais alto o ponto de retorno, de modo que foram encontrados indícios de que a banda C penetrou na vegetação mais que a banda X. As hipóteses indicadas reforçam a ideia de que comprimentos de ondas maiores têm maior penetração sobre os alvos, ou seja, a penetração dos comprimentos de onda em $P > C > X$.

Na validação dos dados ASTER GDEM versão 1 realizada pela NASA e METI, foi avaliado o impacto da cobertura do solo na precisão vertical dos dados ASTER GDEM. Cenas ASTER GEDEM versão 1 foram comparadas com dados do USGS e com pontos de controle de solo. Foram encontrados os valores de RMSE para as classes de cobertura do solo: água (RMSE = 16,53 m), urbano (9,06 m), florestas (10,93 m), áreas abertas (10,33 m) e para uma categoria adicional chamada “excluindo água e gelo e neve”, que visava reduzir os efeitos dessa categoria na precisão dos dados totais. Com as feições água, gelo e neve inclusas, foi obtido RMSE de 10,87 m, e com a exclusão dessas feições, o RMSE caiu para 10,46 m.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se pauta na avaliação de MDEs gratuitos oriundos de sensoriamento remoto e na análise do comportamento dos erros altimétricos em diferentes configurações topográficas e em diferentes de tipos de cobertura do solo. Neste tópico, são caracterizadas as áreas de estudo, descritos os processos cartográficos, computacionais e os métodos utilizados na comparação entre os MDEs. A Figura 8 apresenta um esquema da metodologia aplicada na pesquisa.

Figura 8: Metodologia da pesquisa.

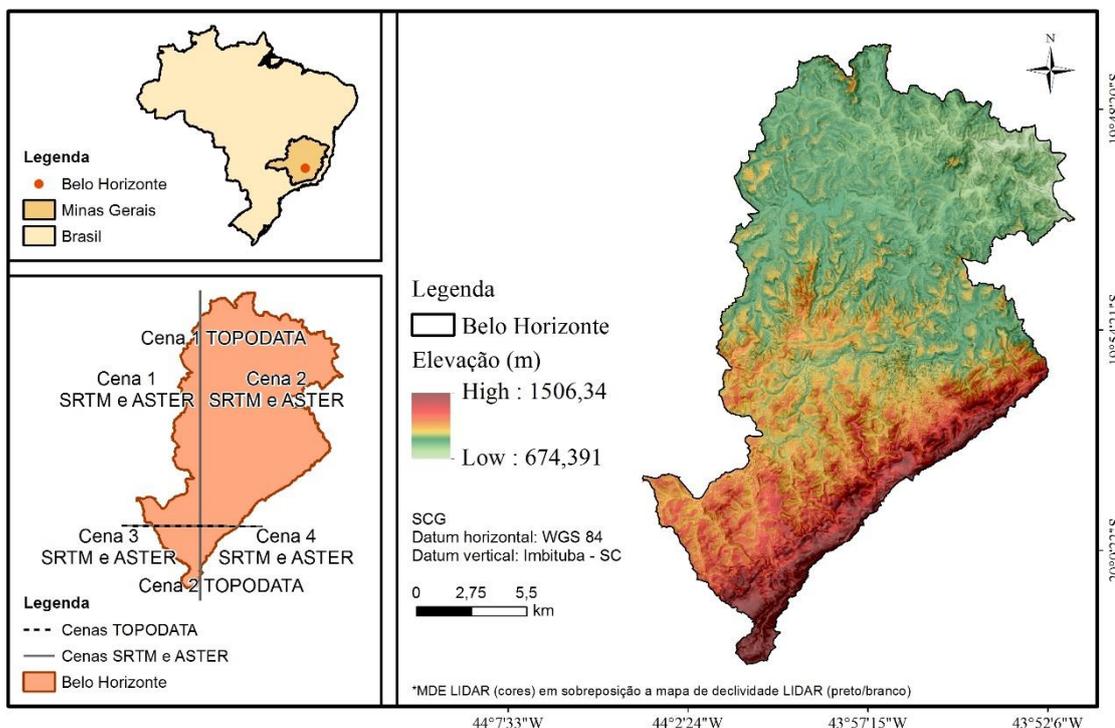


3.1 Área de estudo

A área escolhida para o desenvolvimento do estudo corresponde ao limite do município de Belo Horizonte – Minas Gerais, e possui área de 33.118 hectares (ha). Essa é uma área urbana densamente povoada, mas com trechos de vegetação preservados, como os da área dos Parques Parque Ursulina Andrade Mello e Jardim Botânico da UFMG. Na área de estudo, está localizado o lago artificial Lagoa da Pampulha, de 183 ha, além de outros lagos de pequenas dimensões. A altitude da área de estudo varia entre 674 m e 1505 m, e a declividade varia entre 0% e 159% ou 0° e 76°. Essa área foi selecionada por possuir características topográficas e tipos de cobertura do solo que atendem a especificações do trabalho e também pela disponibilidade de dados LIDAR, de precisão altimétrica de aproximadamente 25 cm disponíveis para confrontação dos dados. A área de estudo está localizada na intersecção de

quatro cenas SRTM v3, quatro cenas SRTM v2, quatro cenas ASTER GDEM e duas cenas TOPODATA, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Área de estudo (Belo Horizonte – Minas Gerais).



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

3.2 Processamento dos dados

Os MDEs SRTM versão 3, ASTER GDEM versão 2 e SRTM versão 2 foram baixados do site do USGS, através do link <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. O MDE TOPODATA foi baixado no site Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do link <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>.

Os dados LIDAR utilizados como referência foram cedidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL). O levantamento foi realizado através de perfilamento a LASER aerotransportado, com precisão vertical de 25cm e densidade média de 1,5 pontos por metro quadrado.

Os processos cartográficos foram realizados no software ArcGis 10.3 ®.

Processos para os dados avaliados:

- Reprojecção: as cenas dos modelos avaliados foram convertidas para Projecção UTM, fuso 23 sul e Datum WGS 84;

- Reamostragem: para comparação entre os dados, os pixels das cenas ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA foram reamostrados para 30 metros, uma vez que o tamanho dos pixels dos MDE de resolução espacial de arco de 1 segundo (1'') é de aproximadamente 30 metros e não exatamente 30. O SRTM v2 foi reamostrado para 90 metros, pelo mesmo motivo. Na reamostragem foi utilizado o método de interpolação por Vizinho Mais Próximo, por este método em relação a outros métodos de interpolação alterar minimamente os valores originais dos pixels, conforme aplicado em Nikolakopolos *et al.* (2006);

- Mosaico: mosaico entre as cenas de cada um dos modelos avaliados;

- Recorte: os mosaicos obtidos foram recortados para o limite da área de estudo;

Processos para os dados de referência:

- Conversão e interpolação: os dados LIDAR, originalmente dispostos em nuvem de pontos (formato *.las*) foram convertidos para *raster*, utilizando o método de interpolação por Vizinho Mais Próximo e tamanho de pixel de 30 metros para comparação com os modelos ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA e tamanho de pixel de 90 metros para comparação com o SRTM v2;

- Reprojecção: O MDE de referência em Projecção UTM, fuso 23, foi reprojetoado do Datum SAD 69 para o Datum WGS 84;

Após essas etapas, foram aplicadas para os dados avaliados e dados de referência:

- Conversão *raster* – ponto: os MDEs avaliados e de referência obtidos para área de estudo foram convertidos um a um para pontos, onde, para cada pixel das imagens, foi gerado um ponto central com seus respectivos, *x*, *y* e *z* listados na tabela de atributos;

- As tabelas de atributos foram unidas com base na localização geográfica (as coordenadas dos eixos *x* e *y*), obtendo-se uma tabela de atributos que relaciona a altimetria de pontos homólogos dos MDEs ASTER GDEM v2, SRTM v3, TOPODATA e LIDAR (de tamanho de pixel de 30 metros) e uma tabela de atributos que relaciona a altimetria de pontos homólogos dos MDE SRTM v2 e LIDAR (de tamanho de pixel de 90 metros).

3.3 Relacionando dados avaliados, dado de referência e declividade do terreno

Para analisar a influência da declividade na precisão altimétrica dos modelos avaliados, foram realizados os procedimentos que seguem.

Gerou-se um mapa de declividade a partir do MDE LIDAR com tamanho de pixel de 30 metros para relacionar com os dados de elevação pontuais dos modelos ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA; e para relacionar com os dados de elevação pontuais do modelo SRTM v2, gerou-se um mapa de declividade a partir do MDE LIDAR, com tamanho de pixel de 90 metros (dados de elevação pontuais, pois todos os MDEs haviam sido convertidos para ponto e unidos com base na localização geográfica, conforme abordado na secção 3.2).

O valor de declividade armazenado em cada pixel do mapa de declividade obtido a partir do MDE LIDAR foi anexado à tabela de atributos dos dados pontuais de elevação. Dessa forma, foi obtida uma tabela de atributos que relaciona os valores declividade do MDE LIDAR e de altimetria dos MDEs ASTER GDEM, SRTMv3, TOPODATA e LIDAR, e uma tabela de atributos que relaciona os valores de declividade do MDE LIDAR e de altimetria dos MDEs SRTM v2 e LIDAR. Essas tabelas foram exportadas de ambiente SIG para o Excel, a partir das quais foram realizados os cálculos estatísticos de índice de correlação, regressão, distribuição de frequências e RMSE. Na Tabela 2, é apresentado um demonstrativo da tabela obtida para os modelos de tamanho de pixel de 30 metros.

Tabela 2: Demonstrativo da tabela que relaciona dados de localização, elevação e declividade, neste caso para os MDEs de tamanho de pixel de 30 metros.

Ponto	X	Y	LIDAR (z)	ASTER GDEM (z)	SRTM (z)	TOPODATA (z)	Declividade LIDAR (%)
1	613317	7793768	1034,61	1033	1032	1038,50	20,00
2	604887	7807598	826,85	835	834	837,33	20,00
3	610107	7812878	831,00	843	834	833,34	1,93
4	609807	7812848	829,60	840	829	831,25	3,85
5	616377	7798448	800,57	817	813	815,35	20,00

Posteriormente, os valores de declividade em cada ponto (X, Y) foram classificados de acordo com EMBRAPA (1979).

Embrapa (1979, p. 27), define para fins de descrição de relevo as seguintes classes:

“Plano - superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com expressivas ocorrências de áreas com declives de 0 a 3%.

Suave ondulado - superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas da ordem de 50 a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves, com expressiva ocorrência de áreas com declives de 3 a 8%.

Ondulado - superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando expressiva ocorrência de áreas com declives entre 8 e 20%.

Forte ondulado - superfície de topografia movimentada formada por outeiros e/ou morros (elevações de 100 a 200 m de altitude relativa), com predominância de declive de 20 a 45%.

Montanhoso - superfície de topografia vigorosa, com predominância de formas acidentadas, usualmente constituída por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes da ordem de 45 a 75%.

Escarpado - regiões ou áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo escarpamentos tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias, vertentes de declives muito fortes de vales encaixados, etc., com declives acima de 75%”.

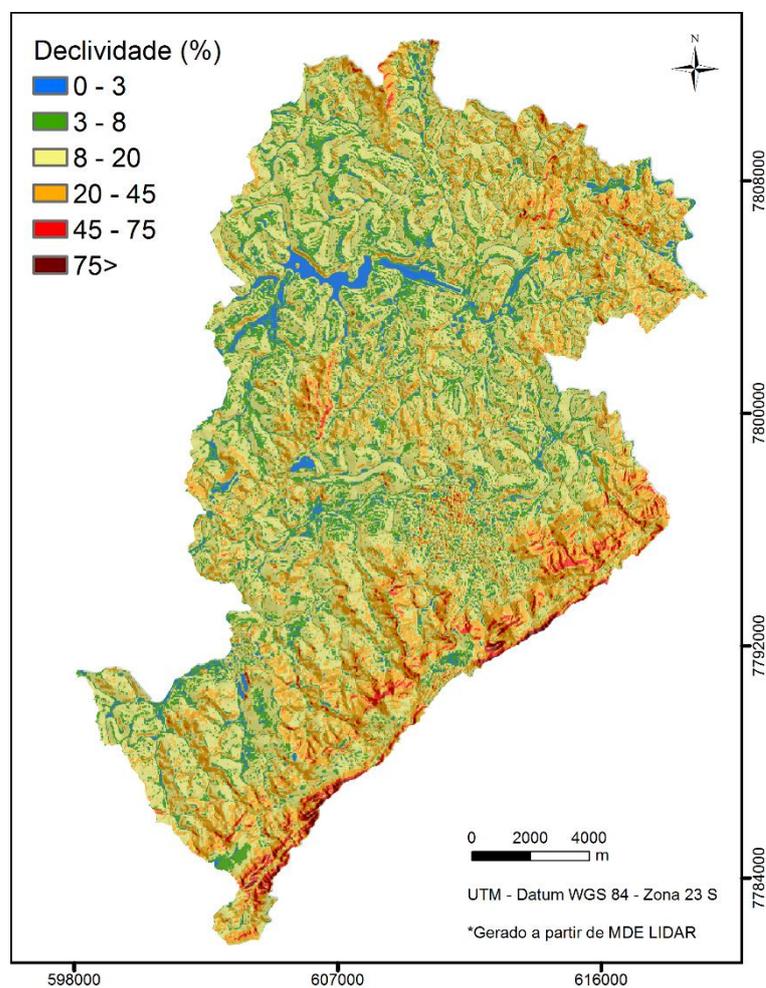
Definida a classe de declividade em cada ponto de elevação, foram então agrupados os pontos que se enquadraram a uma mesma classe. Posteriormente foi calculado o RMSE (calculado demonstrado na Equação 3, da secção 3.5), para estimar o erro entre os valores de elevação observados nos modelos avaliados e os valores de elevação observados no modelo de referência, em cada classe de declividade do relevo definida.

Na Tabela 3, são apresentadas as quantidades de pontos de elevação checados por classe de declividade do relevo para os modelos de tamanho de pixel de 30 metros (ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA) e de 90 metros (SRTM v2). Para demonstração espacial da topografia do terreno, na Figura 10 é apresentado um mapa de declividade da área de estudo.

Tabela 3: Pontos checados por classe de declividade.

Declividade (%)	Relevo	Pontos checados	
		ASTER GDEM/SRTM v3/TOPODATA	SRTM v2
0 - 2,99	Plano	15493	2476
3 - 7,99	Suave - ondulado	65385	10537
8 - 19,99	Ondulado	182090	22052
20 - 44,99	Forte - ondulado	92429	5560
45 - 74,99	Montanhoso	9309	254
< 75	Escarpado	1219	9
		365925	40888

Figura 10: Mapa de declividade, classes definidas conforme EMBRAPA (1979).



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Para analisar a precisão altimétrica dos modelos avaliados, além de calcular os valores de RMSE entre a elevação registrada nos modelos avaliados e no modelo de referência

em cada classe de declividade, foram também gerados em ambiente SIG perfis topográficos traçados em uma mesma localização sobre áreas de baixa e alta declividade para cada um dos MDEs.

3.4 Relacionando dados avaliados, dados de referência e tipos de cobertura do solo

Para a análise entre os erros altimétricos e o tipo de cobertura do solo, foram delimitadas sobre o território de Belo Horizonte feições das classes: água, terreno aberto, urbana unifamiliar, urbana verticalizada e vegetação. As feições foram delimitadas através de vetorização de imagens RapidEye de 2011. Foram escolhidas áreas com baixa variação de declividade, através de um mapa de declividade gerado a partir do MDE LIDAR. Foram selecionadas áreas com um mínimo possível de mudanças na cobertura do solo, através de imagens LANDSAT 5 dos anos 2000 e 2011, estas datas foram definidas com base nas datas de aquisição dos dados avaliados e de referência. Definidas as áreas, foram então selecionados na tabela de atributos referida no item 3.2 os pontos correspondentes a essas áreas. Esses pontos foram exportados do ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) para o Excel, onde foram calculados os RMSE (cálculo demonstrado na Equação 3, da seção 3.5), para estimar o erro entre os valores de elevação observados nos modelos avaliados e os valores de elevação observados no modelo de referência, em cada classe de cobertura do solo. Ainda em ambiente SIG, foram delimitados sobre os MDEs avaliados e de referência perfis topográficos sobre cada um dos tipos de cobertura do solo. Na seção 4.7, serão discutidos os detalhes que levaram à definição desses métodos e demonstrada a localização espacial das áreas selecionadas para cada tipo de cobertura. A seguir, na Tabela 4, são apresentadas as quantidades de pontos checados por tipo de cobertura do solo para os modelos de tamanho de pixel de 30 metros (ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA) e de 90 metros (SRTM v2).

Tabela 4: Pontos checados por classe de cobertura do solo

Tipo de cobertura do solo	Pontos checados	
	ASTER GDEM/SRTM v3/TOPODATA	SRTM v2
Água	2044	226
Vegetação	2095	234
Terreno aberto	2860	317
Urbana verticalizada	3132	348
Urbana unifamiliar	2445	276

3.5 Análises Estatísticas

O coeficiente de correlação de Pearson (r), dado pela Equação 1, é uma medida de associação linear entre variáveis quantitativas que varia de 1 (correlação perfeita positiva) à -1 (correlação perfeita negativa) (PUTH *et al.*, 2014)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Onde $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$; $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ e n = número de observações.

A análise de regressão tem por objetivo verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente e uma variável independente. Na situação analisada, os valores altimétricos extraídos de cada um dos MDEs avaliados são a variável dependente e os valores altimétricos extraídos dos dados LIDAR são a variável independente. A relação funcional entre essas variáveis pode ser descrita através da reta de regressão. De acordo com Reis (2002), o poder explicativo da reta de regressão pode ser medido pelo coeficiente de determinação (R^2), que mostra o quanto a variável dependente Y é explicada pela presença da variável X . O valor de R^2 varia de 0 a 1, de modo que quanto maior, maior é a adequação da função para descrever o fenômeno.

Para avaliar se a distribuição dos dados do modelo de referência e dos modelos avaliados são estatisticamente iguais, foi elaborada uma tabela de frequências dos resíduos encontrados entre a diferença dos dados LIDAR – ASTER GDEM v2; LIDAR – SRTM v3, LIDAR – TOPODATA; LIDAR – SRTM v2. Para definição do número de classes a serem utilizadas na tabela de distribuição de frequências, aplicou-se a fórmula de Sturges, conforme a seguir:

$$k = 1 + 3,3 \times \log_{10}(n) \quad (2)$$

A partir da distribuição da frequência dos resíduos, foram gerados gráficos e tabelas para análise dos resíduos observados entre os conjuntos de dados.

O Erro Médio Quadrático (EMQ) ou como também chamado *Root Mean Squared Error* (RMSE) é um dos principais parâmetros de avaliação utilizado pela USGS para avaliar a precisão altimétrica e planimétrica dos MDES ASTER GDEM e SRTM. O cálculo do RMSE

dado pela Equação 3 foi calculado buscando estimar o erro entre os valores observados (ASTER GDEM v2, SRTM v3, TOPODATA e SRTM v2) e os valores de referência (LIDAR), em relação ao número de pontos checados (CHRYSOULAKIS *et al.*, 2011). O cálculo foi aplicado para cada classe de declividade do revelo, para cada classe de cobertura do solo e para todos os pontos checados, ou seja, para área de estudo como um todo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta z_i^2} \quad (3)$$

Onde: $\delta z_i = Z_{\text{ASTER GDEM v2}} - Z_{\text{LASER}}$ ou $\delta z_i = Z_{\text{SRTM v3}} - Z_{\text{LASER}}$ e n é o número de pontos de checagem.

3.6 Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD

O Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD é um indicador estatístico utilizado no Brasil criado pela Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais - ET-ADGV (DSG 2015). Para que um produto cartográfico seja classificado em uma determinada classe e escala, devem ser atendidas as condições: erro padrão (EP) * 1,6449 deve ser igual ou inferior ao valor de tolerância denominado PEC previsto na norma para determinada escala; e EP igual ou inferior ao previsto na norma para determinada escala. Os valores oficiais de tolerância PEC e EP para as 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 dos Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) e para os Pontos Cotados, segundo DSG (2015), podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5: Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.

1:50.000		1:100.000		1:250.000	
PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
15	10	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: DSG (2015)

De acordo com o PEC-PCD, os produtos cartográficos digitais podem ser classificados nas classes A, B, C e D nas escalas de 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 (PEREIRA e NERO, 2012; DSG, 2015; SANTOS et al., 2016; SANTOS, 2010).

O cálculo do PEC para os MDEs foi realizado de maneira automática no software GeoPEC (SANTOS et al., 2010). Para realização do cálculo no software foram utilizados como entrada os atributos (x,y e z) de cada um dos modelos avaliados e os atributos (x,y,z) do modelo de referência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo, apresenta os resultados obtidos com a metodologia aplicada. Expõe a relação entre os métodos de aquisição dos MDEs e a ocorrência de erros altimétricos. Aponta a precisão altimétrica dos modelos avaliados para área de estudo a partir de diferentes métodos de avaliação, bem como, a precisão altimétrica dos modelos avaliados em diferentes classes de declividade do terreno (plano, suave ondulado, ondulado, montanhoso e escarpado), e em diferentes tipos de cobertura do solo (água, terreno aberto, vegetação, área urbana unifamiliar e urbana verticalizada), também espacializa e analisa os erros altimétricos observados nos MDEs avaliados.

4.1 Supervisão dos MDEs e Metadados

Nos metadados dos MDEs baixados, foram verificadas as principais características dos produtos, e sumarizadas na TABELA 6. Os Metadados podem ser basicamente definidos como “dados que descrevem os dados”, ou seja, são informações úteis para identificar, localizar, compreender e gerenciar os dados (IBGE, 2013).

Tabela 6: Descrição dos modelos avaliados.

MDE	Produtores	Aquisição Disponibilização	Resolução espacial e tamanho de pixel	Referência	Formato
ASTER GDEM v2	NASA/ME TI	17/10/2011* 16/11/2011	1" (~ 30 m)	SCG/WGS 84/ EGM96	Geotiff/ 16 bits
SRTM banda C de 1" (SRTM v3)	NGA/ NASA	11/02/2000 23/09/2014			Geotiff/ 16 bits
TOPODATA	INPE	11/02/2000 01/08/2008		SCG/WGS 84	Geotiff/ 32 bits
SRTM banda C de 3" (SRTM v2)	NGA/ NASA	11/02/2000 01/02/2005	3" (~ 90 m)	SCG/WGS 84/ EGM96	Geotiff/ 16 bits

*Segundo os metadados o ASTER GDEM foi gerado em 16/11/2011, no entanto o modelo foi produzido a partir de várias cenas ASTER coletadas em datas não divulgadas, sabe-se apenas que para a versão 2 do ASTER GDEM foram inclusas cenas coletadas a partir de 2008 que não haviam sido utilizadas no ASTER GDEM versão 1.

Os MDEs avaliados foram analisados a fim de identificar falhas relacionadas à ausência de dado de elevação nos pixels, os chamados “voids” pelos produtores dos dados. A versão 1 do SRTM, por exemplo, é chamada de SRTM *non-void filled*, que corresponde ao

SRTM sem preenchimentos de espaços vazios, e as Versões 2 e 3 do SRTM são versões *void-filled*, ou seja, com o preenchimento de espaços vazios. Nos processos de preenchimentos de vazios ocasionados por falhas de representação da elevação, são utilizados dados de elevação de outras fontes. No caso do ASTER GDEM v2, uma das fontes utilizadas para preencher vazios é o SRTM, e no SRTM, uma das fontes utilizadas para preencher vazios é o ASTER GDEM.

No ASTER GDEM, a identificação de *voids* pode ser realizada por meio do arquivo *raster* denominado QA, que acompanha o MDE. No arquivo QA, os valores positivos indicam a quantidade de pares estereoscópicos utilizados para representar a elevação de um pixel no MDE. De modo que, quanto menor a quantidade de pares utilizados, pior será a precisão da elevação registrada; já os valores negativos indicam locais onde não foi possível efetivar essa representação com dados próprios do ASTER GDEM, tendo sido utilizada, para esses casos, interpolação de elevação de outros MDEs, como o SRTM banda C de arco de 3 segundos (NASA e METI, 2011). Ocorrências de baixa precisão nas elevações registradas ou falhas de ausência de representação de elevações no ASTER GDEM podem estar relacionadas aos locais com incidência de nuvens, sombras, água e a áreas de baixo contraste da cobertura do solo (LANG e WELCH, 1999). Para a área de estudo, foi possível observar que somente sobre corpos d'água (Lagoa da Pampulha) há uma concentração de pixels com quantidade de pares estereoscópicos utilizados menor que cinco. Em áreas com quantidades de pares estereoscópicos inferiores a 5, os valores de RMSE tendem a aumentar (NASA e METI, 2011). Apesar disso, na área de estudo não foram identificados pixels com representação de elevação, cuja origem não seja própria do ASTER GDEM.

No SRTM, a ocorrência de *voids* em grande parte dos casos está associada a áreas íngremes e a superfícies de baixa retrodifusão, como a superfície da água. Nesses casos, o sensor de radar não consegue captar e representar a elevação do local imageado, devido à ausência ou insuficiência de sinal de retorno na direção do retroespalhamento (direção do sensor). No processamento dos dados SRTM, vazios com menos de 16 pixels foram preenchidos por interpolação com dados de outras fontes; e vazios maiores permaneceram com lacunas de representação altimétrica, sendo identificadas no MDE pelo valor de pixel de -32768, para a área de estudo não foram identificadas lacunas deste tipo no MDE SRTM.

A diferença entre os *datums* verticais utilizados e a diferença entre as datas de aquisição dos modelos avaliados e o modelo de referência contribuem com um erro desconhecido para o aumento dos resíduos encontrados entre eles. O ASTER GDEM v2, SRTM

v3 e SRTM v2 estão configurados em *datum* vertical EGM96 e o LIDAR em *datum* vertical Imbituba. As datas de aquisição dos dados SRTM e LIDAR foram, respectivamente, fevereiro de 2000 e novembro de 2007. O ASTER GDEM foi gerado a partir de múltiplas cenas do satélite ASTER, com datas não divulgadas.

Para a avaliação dos modelos, foi suprimida a área que corresponde à lamina d'água da Lagoa da Pampulha. A área suprimida foi delimitada segundo vetorização realizada sobre imagem RapidEye de 08/09/2011 e possui 183 hectares (ha). Essa supressão foi devida às limitações que o ASTER GDEM e SRTM tem para representar superfícies de água. No SRTM, essa limitação está associada ao baixo índice de rugosidade da superfície de lagos, e no ASTER GDEM pode estar relacionada à dificuldade de detecção de pontos homólogos em cenas diferentes nesse tipo de superfície. Devido às pequenas dimensões, outros corpos d'água existentes na área de estudo permaneceram, por se entender que a permanência não impactaria as avaliações propostas.

4.2 Histogramas e Estatísticas Descritivas

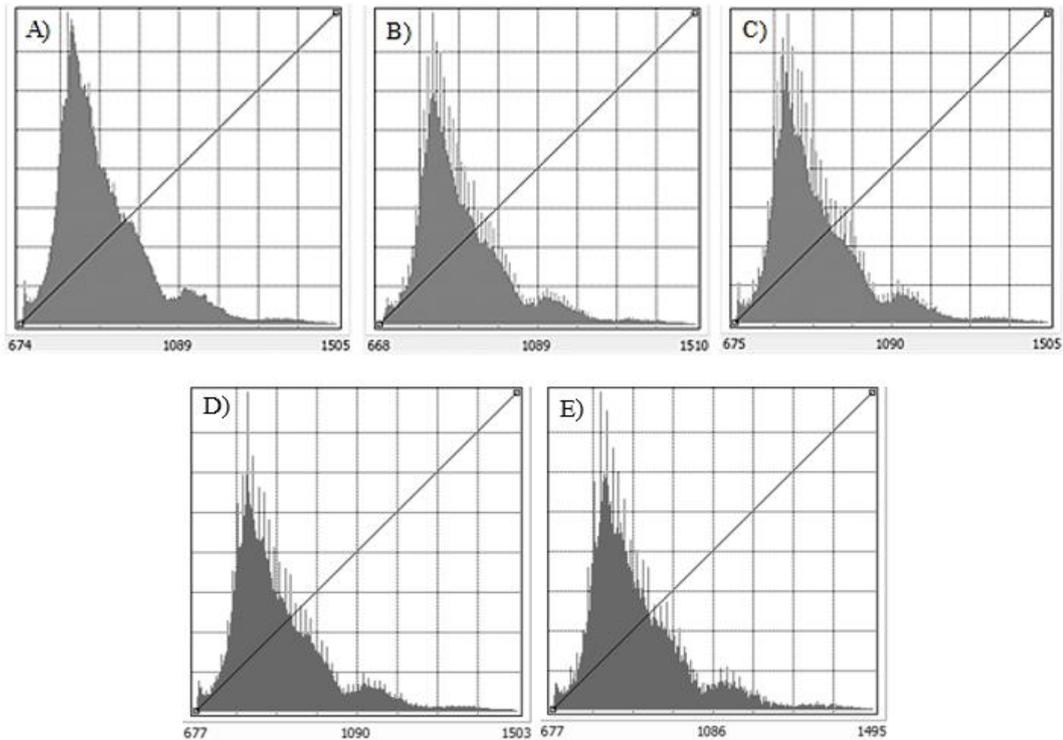
A análise dos histogramas e das estatísticas descritivas (número de máximo, mínimo, média, assimetria e curtose) ofereceram informações preliminares a respeito dos conjuntos de dados para a área de estudo (Figura 11 e Tabela 7). A semelhança entre os histogramas indica que os modelos pertencem a regiões homólogas, e à primeira vista é observado um comportamento semelhante entre eles. No entanto, pode ser verificada a maior quantidade de *outliers* presentes nos modelos avaliados e a menor quantidade de *outliers* presentes no modelo de referência (Figura 11).

Outlier, no caso dos MDEs, correspondem a um valor de elevação atribuído a um pixel que destoa ou que apresenta grande discrepância de valor em relação à elevação atribuída aos pixels vizinhos. Numa área com grande heterogeneidade de elementos, como no caso da área de estudo utilizada neste trabalho, nem sempre um *outlier* vai estar associado a um erro; como pode ser notado, no próprio modelo de referência há *outliers*. Em MDEs, um *outlier* pode estar associado a um erro de representação da elevação ou à própria realidade, como, por exemplo, a representação de um alto edifício em meio a construções mais baixas ou a um viaduto.

As estatísticas descritivas foram calculadas a um nível de confiança de 95% (Tabela 7). Os números de máximo, mínimo, média e desvio padrão indicaram comportamento

semelhante entre os conjuntos de dados. Com relação ao padrão de distribuição dos dados em torno da média, observou-se que os dados de elevação LIDAR, ASTER GDEM, SRTM v3, TOPODATA e SRTM v2 não seguem uma distribuição normal, são positivamente assimétricos e apresentam curtose leptocúrtica (grau de achatamento da curva maior que zero).

Figura 11: Histogramas dos Modelos.



Legenda: A) LIDAR; B) ASTER GDEM; C) SRTM v3; D) TOPODATA; E) SRTM v2

Tabela 7: Estatísticas descritivas.

MDE	N	Mín.	Max.	Media	D. Padrão	Assimetria	Curtose
LIDAR	365925	674,48	1505,25	893,31	123,06	1,42	2,57
ASTER		668	1510	893,13	123,01	1,45	2,63
SRTM 30 m		675	1505	893,80	123,81	1,42	2,55
TOPODATA		676,21	1505,83	894,65	125,62	1,44	2,59
SRTM 90 m	40889	677	1495	893,74	123,69	1,42	2,52

4.3 Correlação, Regressão Linear e RMSE

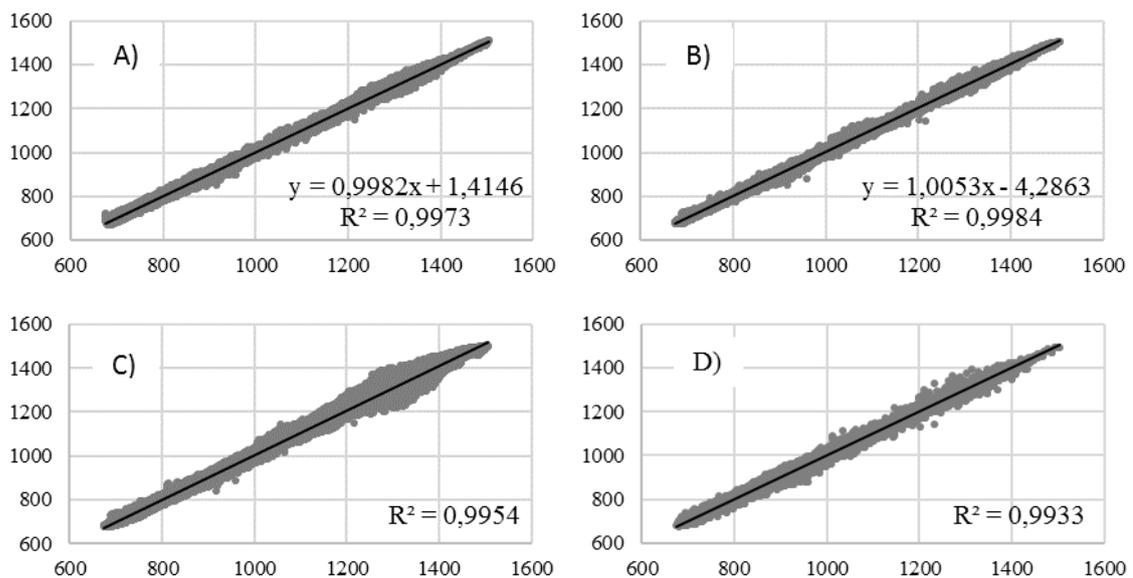
Os índices de correlação encontrados indicam a existência de forte correlação linear positiva entre os modelos avaliados e o modelo de referência. A diferença entre os índices de correlação é sutil, mas aponta maior ajuste do SRTM v3 ao modelo de referência e melhoramento do TOPODATA em relação do SRTM v2 (Tabela 8).

Tabela 8: Coeficiente de Correlação de Pearson.

Correlação de Pearson			
ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
0,9986	0,9992	0,9977	0,9966

Essa relação se confirmou por meio da análise de regressão linear simples, demonstrada por meio de gráficos de dispersão, na qual a análise dos coeficientes de determinação (R^2) da reta de regressão demonstra que o modelo ASTER GDEM é adequado para descrever o modelo de referência em 99,73%, o modelo SRTM v3 em 99,84%, TOPODATA em 99,54% e SRTM v2 em 99,33% (Figura 12).

Figura 12: Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação (R^2)



Legenda: A) ASTER GDEM V2; B) SRTM V3; C) TOPODATA; D) SRTM V2

Os coeficientes de correlação e de Determinação (R^2) foram testados para tamanhos amostrais menores e a forte correlação linear permaneceu (Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 9: Correlação de Pearson para diferentes tamanhos amostrais.

Correlação de Pearson				
Amostras	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
500	0,9986	0,9992	0,9976	0,9971
1000	0,9985	0,9992	0,9977	0,9961

Tabela 10: Coeficiente de Determinação (R^2) para diferentes tamanhos amostrais.

Coeficiente de Determinação (R^2)				
Amostras	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
500	0,9971	0,9984	0,9953	0,9941
1000	0,997	0,9984	0,9953	0,9923

Foram calculados os RMSE dos modelos avaliados em relação ao MDE de referência para área de estudo (Belo Horizonte - MG). Os resultados apontaram erros menores para o SRTM v3 (RMSE = 4,95m), seguido do ASTER GDEM v2 (RMSE = 6,44m). O RMSE para o TOPODATA (RMSE = 8,90 m) e SRTM v2 (RMSE = 10 m) indicam que houve um melhoramento na precisão do TOPODATA em relação ao SRTM v2. Assim, para essa área, se considerada integralmente, é mais vantajoso utilizar o MDE SRTM v3. Os resultados estão sumarizados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores de RMSE (m) para totalidade da área de estudo (Belo Horizonte).

RMSE (m)			
ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
6,44	4,95	8,9	10

4.4 Análise da Distribuição Estatística da Frequência dos Erros

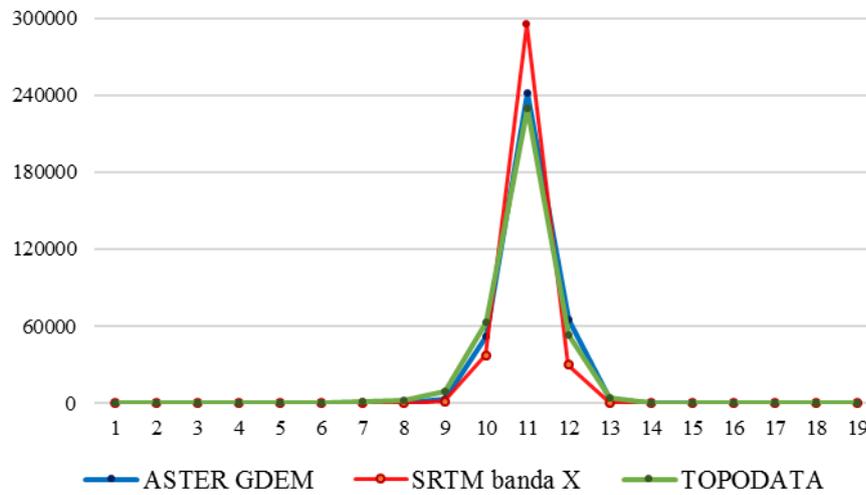
Para avaliar a acurácia posicional de dados espaciais, utiliza-se de uma amostra de checagem. As posições do dado espacial são confrontadas com as posições da amostra de checagem, obtendo-se, assim, um conjunto de discrepâncias posicionais (SANTOS *et al.* 2016).

Os valores de elevação de cada um dos modelos avaliados foram subtraídos dos valores de elevação do modelo de referência (ASTER GDEM v2 – LIDAR; SRTM v3 – LIDAR; TOPODATA – LIDAR; SRTM v2 – LIDAR). Com essa operação aritmética, foram obtidos os resíduos existentes entre cada um dos modelos avaliados e o modelo de referência, em unidade de metros. As frequências dos resíduos foram agrupadas em quantidade de classes definidas conforme a fórmula de Sturges (Equação 2), abordada no item 3.4 da metodologia. Posteriormente, foram definidas as amplitudes das classes. Para o ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA que possuem o mesmo tamanho amostral, foram obtidas 19 classes. A amplitude encontrada para o ASTER GDEM foi de 6,38; para o SRTM v3 foi de 7,47; e para o TOPODATA foi de 11,06. A fim de otimizar a comparação entre esses modelos, optou-se por utilizar a maior amplitude encontrada entre eles (a amplitude de 11,06), e dessa forma agrupar a distribuição de frequências desses modelos em uma única tabela. Para o SRTM v2, foram obtidas 16 classes e amplitude igual a 11,19. A distribuição de frequências encontrada para os modelos ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA é apresentada na Tabela 12 e Figura 13, e a distribuição de frequências encontrada para MDE SRTM v2 é apresentada na Tabela 13 e Figura 14.

Tabela 12: Tabela da distribuição de frequências dos resíduos entre ASTER GDEM v2/ SRTM v3/ TOPODATA e o modelo de referência.

Classes	Intervalo De Classes		Distribuição de Frequências		
			ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA
1	-117,39	-106,23	0	0	11
2	-106,23	-95,07	0	0	11
3	-95,07	-83,92	0	0	35
4	-83,92	-72,76	0	0	110
5	-72,76	-61,60	0	3	272
6	-61,60	-50,44	6	20	533
7	-50,44	-39,28	69	64	1008
8	-39,28	-28,12	411	258	2630
9	-28,12	-16,97	2937	1761	9647
10	-16,97	-5,81	52281	37471	63494
11	-5,81	5,35	241911	295286	230028
12	5,35	16,51	65135	30199	53108
13	16,51	27,67	2842	727	4307
14	27,67	38,83	286	111	494
15	38,83	49,98	39	21	104
16	49,98	61,14	6	1	75
17	61,14	72,30	2	2	35
18	72,30	83,46	0	1	16
19	83,46	94,62	0	0	7
			365925	365925	365925

Figura 13: Gráfico da distribuição dos resíduos entre ASTER GDEM v2/ SRTM v3/ TOPODATA e o modelo de referência.



Com base na Tabela 12 e no gráfico da Figura 13, é possível observar que os menores resíduos (entre -5,81 m e 5,35 m) apareceram com maior frequência, sendo esse um indicativo da qualidade dos modelos ASTER GDEM, SRTM v3 e TOPODATA. É possível observar ganho do SRTM v3 em relação aos demais modelos, uma vez que esse agrupou uma quantidade maior de pontos com resíduos menores, onde de um total de 365925 pontos, 295286, ou seja, 80,69% dos pontos apresentaram resíduos entre -5,81 m e 5,35 m. Em seguida, o ASTER GDEM v2 contabilizou 241911 pontos de um total de 365.925 pontos, ou seja, 66,11% dos pontos apresentaram resíduos entre -5,81 m e 5,35 m. E o TOPODATA agrupou 230028 pontos de um total de 365.925, ou seja, 62,86% apresentaram resíduos entre -5,81 m e 5,35 m.

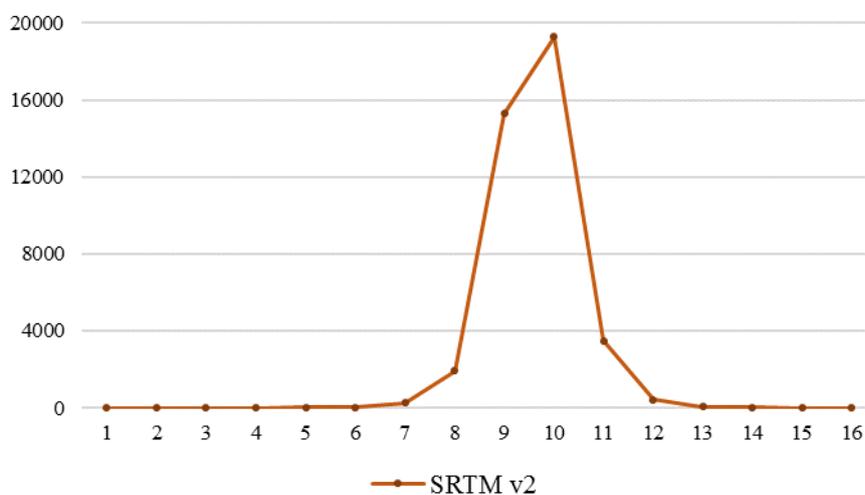
Por outro lado, as classes de 1 a 5 e as classes 18 e 19 mostraram que o ASTER GDEM foi o modelo que apresentou resíduos menos discrepantes, como, por exemplo, a classe 5, na qual o SRTM identificou 3 pontos com resíduos entre -72,76 e -61,60, o TOPODATA 272 pontos e o ASTER GDEM zero pontos.

Para a distribuição de frequências para o SRTM v2, apresentadas na Tabela 13 e Figura 14, destacam-se as classes 10, na qual de um total de 40889 pontos, 19298 pontos, ou seja, 47% apresentaram resíduos entre -2,47 m e 10,82 m, e a classe 9, de um total de 40889 pontos, 15285 pontos, ou seja, 37,38% apresentaram resíduos entre -15,76 m e -2,47 m.

Tabela 13: Tabela da distribuição dos resíduos entre SRTM v2 e o modelo de referência.

Classes	Intervalos de Classes		SRTM v2
1	-122,09	-108,80	1
2	-108,80	-95,51	1
3	-95,51	-82,22	2
4	-82,22	-68,93	9
5	-68,93	-55,63	14
6	-55,63	-42,34	44
7	-42,34	-29,05	268
8	-29,05	-15,76	1933
9	-15,76	-2,47	15285
10	-2,47	10,82	19298
11	10,82	24,11	3497
12	24,11	37,40	430
13	37,40	50,70	77
14	50,70	63,99	23
15	63,99	77,28	5
16	77,28	90,57	2
			40889

Figura 14: Gráfico da distribuição dos resíduos entre SRTM v2 e o modelo de referência.



4.5 PEC – PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Digitais)

Até aqui têm sido abordados os erros identificados nos modelos avaliados em relação ao modelo de referência. No entanto, a pertinência dos erros observados nos MDEs para uma aplicação está diretamente relacionada ao objetivo da utilização dos MDEs e à escala de mapeamento aplicada. Então, a fim de identificar a escala de compatibilidade dos modelos, foi calculado o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

O Padrão de Exatidão Cartográfica foi calculado automaticamente no software GeoPEC (SANTOS, 2010) e de acordo com a norma ET-ADGV (DSG 2015), com os critérios já abordados na secção 2.3. O resumo das classificações obtidas é apresentado na Tabela 14. Ambos os modelos são compatíveis com a escala de 1:250.000 com padrão classe A. Na escala de 1:100.000, os modelos ASTER GDEM e SRTM v3 são classificados como padrão classe A e TOPODATA e SRTM v2 com padrão classe B. Na classificação na escala de 50.000, o ASTER GDEM foi classificado com classe C, o SRTM v3 como classe B, o TOPODATA classe D e o SRTM v2 não obteve nenhuma classificação, não sendo, portanto, indicado para mapeamentos nesta escala.

Tabela 14: Avaliação dos modelos segundo o PEC.

Escala	*Equid.	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
1:250.000	100 m	A	A	A	A
1:100.000	50 m	A	A	B	B
1:50.000	20	C	B	D	Sem classificação

*Equidistância entre curvas de níveis

Os resultados encontrados para o ASTER GDEM são compatíveis com o indicado por Lang e Welch (1999), de que os dados ASTER são adequados para mapeamentos nas escalas de 1: 100.000 e 1:250.000 e, em alguns casos, na escala de 1:50.000.

Segundo Valeriano (2008), a aquisição dos dados SRTM de arco de 3 segundos (no caso SRTM v1) foi planejada para suprir mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000; dessa forma, mantiveram-se nessa perspectiva o SRTM v2 e o TOPODATA. A disponibilização do SRTM v3 representou ganho em relação à escala indicada para o primeiro produto, SRTM v1, disponibilizado pelo USGS.

Na literatura, algumas classificações segundo o PEC indicam: SRTM v2, ASTER GDEM e TOPODATA classe A na escala de 1:100.000 (DIAS *et al.*, 2011); ASTER classe A na escala de 1:100.000 (RODRIGUES, DEBIASI e SOUSA, 2010); ASTER GDEM v2 e TOPODATA classe A na escala de 1:100.000 e SRTM v2 classe A na escala de 1:250.000 (GARAFALO e LIESENBERG, 2015); Oliveira (2015) encontrou resultados menos otimistas, com ASTER GDEM e TOPODATA classe B na escala de 1:100.000 e SRTM v2 classe A na escala 1:200.000.

A extração e representação de curvas de níveis obtidas a partir de MDEs devem ser elaboradas de acordo com a precisão altimétrica do produto utilizado e de modo a preservar a comunicação do mapa; não convém, por exemplo, utilizar um produto produzido para atender a mapeamentos na escala de 1: 100.000 na extração e representação de curvas de níveis com equidistância de 2 m. O manual de Noções Básicas de Cartografia do IBGE, define equidistância como a distância vertical entre as curvas de nível. Essa equidistância varia de acordo com a escala da carta, com o relevo e com a precisão do levantamento. Na Tabela 15, são indicadas as escalas de mapeamento e a equidistância entre as curvas de nível que devem ser preferencialmente utilizadas para preservar a comunicação visual dos mapas, segundo o manual de Noções Básicas de Cartografia do IBGE.

Tabela 15: Escalas de mapeamento e equidistância entre curvas de níveis.

Escala	Equidistância
1:25.000	10 m
1:50.000	20 m
1:100.000	50 m
1:250.000	100 m
1:1.000.000	100 m

Fonte: IBGE, Manual de Cartografia.

4.6 Relação entre Erros Altimétricos em MDEs e a Declividade do Terreno

No item 4.3 foram apresentados os valores de RMSE calculados para área de estudo como um todo. Nesta seção, são apresentados os valores de RMSE calculados para cada classe de declividade do relevo, de modo a demonstrar o quanto a precisão altimétrica é afetada pela declividade do terreno. Para ambos os modelos avaliados, foi observado um crescimento do erro altimétrico conforme aumenta a declividade (Figura 15).

A Equipe de validação ASTER GDEM v2 (2011), admite para América Sul RMSE de 8,78 m. Na avaliação proposta na presente pesquisa, as classes de relevo montanhoso (RMSE = 12,13 m) e escarpado (RMSE = 18,24) não se mantiveram nessa perspectiva. A validação dos produtos SRTM (FARR *et al.*, 2007), admite a um nível de confiança de 90%, precisão absoluta de ± 16 m. Na avaliação proposta na presente pesquisa, não se enquadraram a essa perspectiva a classe de relevo escarpado, do SRTM v3, e as classes montanhoso e escarpado do TOPODATA e do SRTM v2.

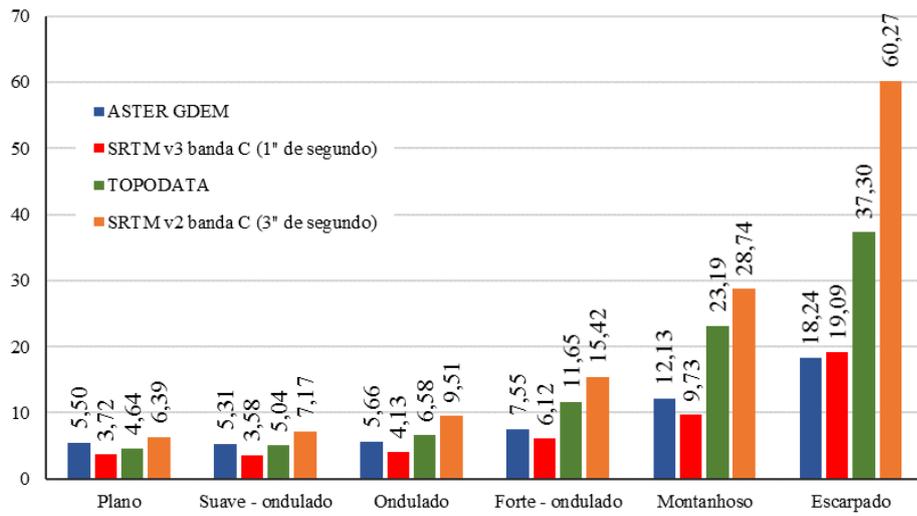
Para representar áreas de relevo plano (declividade entre 0 e 2,99%) e relevo suave - ondulado (declividade entre 3 e 7,99%), os modelos indicam menor erro altimétrico na seguinte ordem: SRTM v3<TOPODATA<ASTER GDEM<SRTM v2. Algo a se destacar é o menor erro do TOPODATA em relação ao ASTER GDEM para representação dessas classes de relevo, tendo em vista que o TOPODATA é resultado de refinamentos e interpolação do SRTM v1 de arco de 1 segundo disponibilizado pela USGS e que o ASTER GDEM é originalmente já disponibilizado com resolução de arco de 1 segundo.

Para representar áreas de relevo ondulado (declividade entre 8 e 19,99%), forte montanhoso (declividade entre 20 e 44,99%) e montanhoso (declividade entre 45 e 74,99%), os modelos indicam menor erro altimétrico na seguinte ordem: SRTM v3 <ASTER GDEM<TOPODATA <SRTM v2.

Para representar áreas de relevo escarpado (declividade>75%), o ASTER GDEM demonstrou desempenho melhor para representação do relevo em relação aos demais modelos. Essa foi a única classe em que o SRTM v3 não foi o modelo com menores erros altimétricos. A maior sensibilidade do SRTM para representar áreas com as grandes declividades também já foi verificada por Gorokhovich e Voustantiounk (2006), Tighe e Chamberlain (2009) e Ludwig e Schneider (2006). Conforme já detalhado na seção 2.4, as distorções geométricas que geram os efeitos de compressão, inversão e sombra causadas pelo imageamento de visada lateral dos sensores de radar em consonância com a topografia do relevo, são as principais causas da maior suscetibilidade dos sensores de radar, como é o caso do SRTM, em apresentar erros em regiões íngremes.

É importante destacar o desempenho do TOPODATA em relação ao SRTM v2, que apresentou considerável melhoramento para representar todas as classes de relevo abordadas. O aprimoramento é mais notável nas regiões de relevo escarpado, onde o TOPODATA apresentou RMSE = 37,30 m e o SRTM v2 apresentou RMSE= 60,27 m. Para as classes Plano e suave ondulado o TOPODATA apresentou erros menores do que o ASTER GDEM, este resultado corrobora com Oliveira (2015) que também encontrou para a classe de relevo plano menores desvios para TOPODATA e maiores desvios para o ASTER GDEM em relação a dados LIDAR.

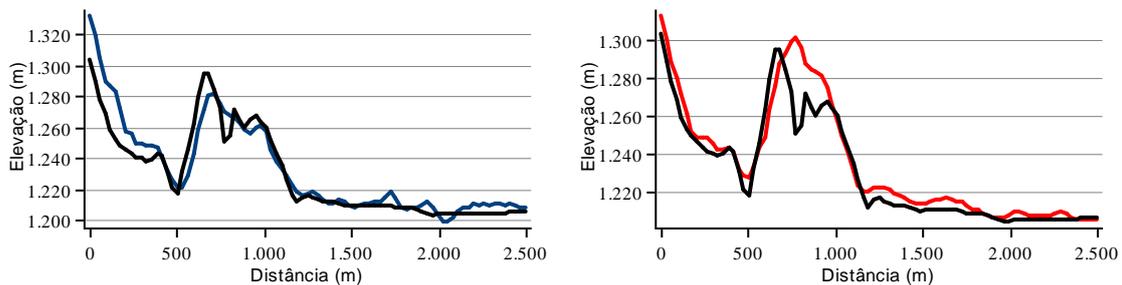
Figura 15: Valores de RMSE (m) para as classes de declividade do relevo.

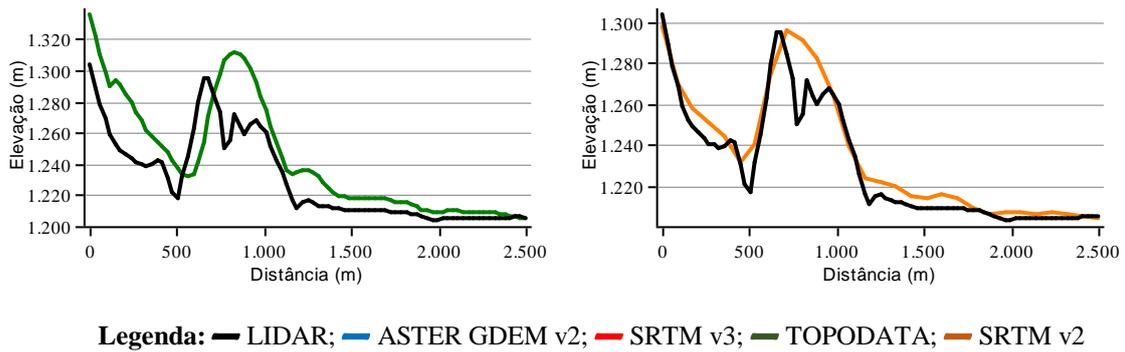


Legenda: — ASTER GDEM V2; — SRTM V3; — TOPODATA; — SRTM v2

Foram gerados perfis topográficos para os MDEs avaliados e de referência (Figura 16). Os perfis foram traçados sobre relevo que varia de montanhoso no ponto inicial (E=605185,71 m; N=7784553,89 m) a plano no ponto final (E=602685,71 m; N=7784553,89 m). A análise visual desses perfis reforça a relação entre declividade e erros altimétricos. No relevo plano os perfis dos dados avaliados se ajustaram melhor ao perfil gerado a partir do dado de referência, enquanto que no relevo montanhoso as discrepâncias são mais evidentes.

Figura 16: Perfis topográficos em trechos de alta e baixa declividade.



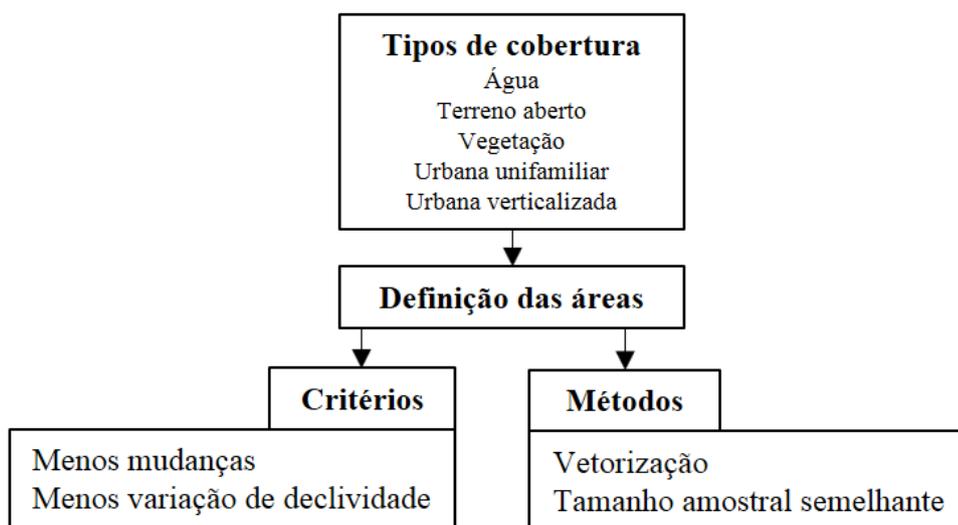


4.7 Relação entre Erros Altimétricos em MDEs e o Tipo de Cobertura do Solo

Como o SRTM utiliza um sistema baseado em radar, a qualidade do sinal refletido depende das propriedades de dispersão do objeto, do ângulo de incidência local e da topografia. É, portanto, esperado que a precisão dos modelos SRTM v3 e SRTM v2 e do TOPODATA, por ser derivado do SRTM, apresente alguma variação com os tipos de cobertura do solo (LUDWIG e SCHNEIDER, 2006). A Equipe de avaliação ASTERGDEM (2011) identificou variação de erros altimétricos em diferentes tipos de cobertura do solo.

Para a análise entre os erros observados e os tipos de cobertura do solo, foram seguidas as etapas demonstradas na Figura 17.

Figura 17: Etapas metodologias: análise da relação entre erros altimétricos em MDEs e tipos de cobertura do solo.



Para reconhecimento prévio dos tipos de cobertura do solo existentes na área de estudo e definição das classes a serem avaliadas, foram utilizadas imagens RapidEye adquiridas através do portal do Ministério do Meio Ambiente (MMA). Na seleção das imagens RapidEye, levou-se em consideração a disponibilidade das imagens, a cobertura de nuvens e as datas de aquisição dos dados avaliados e de referência. Foram selecionadas as cenas 2329919 e 2329819 de 08/09/2011. Desse modo, foram determinadas para avaliação as classes: água, terreno aberto, vegetação, área urbana unifamiliar e urbana verticalizada.

Os critérios para seleção das áreas foram: áreas com menos variação de declividade do terreno e menos mudanças na cobertura do solo. O critério de menos variação de declividade foi definido por base nos resultados já obtidos anteriormente, que determinaram que a declividade influencia a precisão altimétrica dos modelos. Com isso, buscou-se evitar ocorrências como as relatadas em Ludwig e Schneider (2006), em que as amostras de espaço aberto e vegetação, por estarem localizadas em encostas, influenciaram os resultados obtidos na avaliação quanto aos tipos de cobertura do solo. No presente trabalho, para identificação das áreas com menos declive, foi utilizado um mapa de declividade gerado a partir do MDE LIDAR.

O critério de menos mudança na cobertura do solo foi determinado devido à aquisição dos modelos avaliados e de referência terem ocorrido em datas diferentes, sendo, portanto, de interesse que as mudanças na cobertura do solo ocorridas entre a aquisição dos modelos influenciassem o mínimo possível nas avaliações. Para esse processo, foram baixadas imagens LANDSAT 5 de dois períodos, uma de 2000, ano de aquisição do SRTM, e uma de 2011, ano de disponibilização do ASTER GDEM. O ano 2011 foi estabelecido por entender que, apesar de as cenas utilizadas para geração do ASTER GDEM não serem divulgadas, a data mais recente que poderia ter sido utilizada na criação desse modelo seria referente a esse ano; além disso, o ano 2011 engloba também as mudanças ocorridas até 2007, ano de aquisição do LIDAR. Determinado o ano de aquisição das imagens a serem utilizadas, o mês e o dia foram definidos com base na baixa cobertura de nuvens. As cenas selecionadas correspondem a LANDSAT 5 - instrumento TM - órbita 218 - ponto 074 - datas 22/09/2000 e 05/09/2011, e foram georreferenciadas através de pontos homólogos localizados nas imagens RapidEye. Como auxílio na identificação de mudanças, também foram utilizadas imagens históricas do Google Earth.

As imagens LANDSAT foram utilizadas apenas para identificar as áreas de menos mudança na cobertura do solo, para delimitar as áreas que representariam cada tipo de cobertura

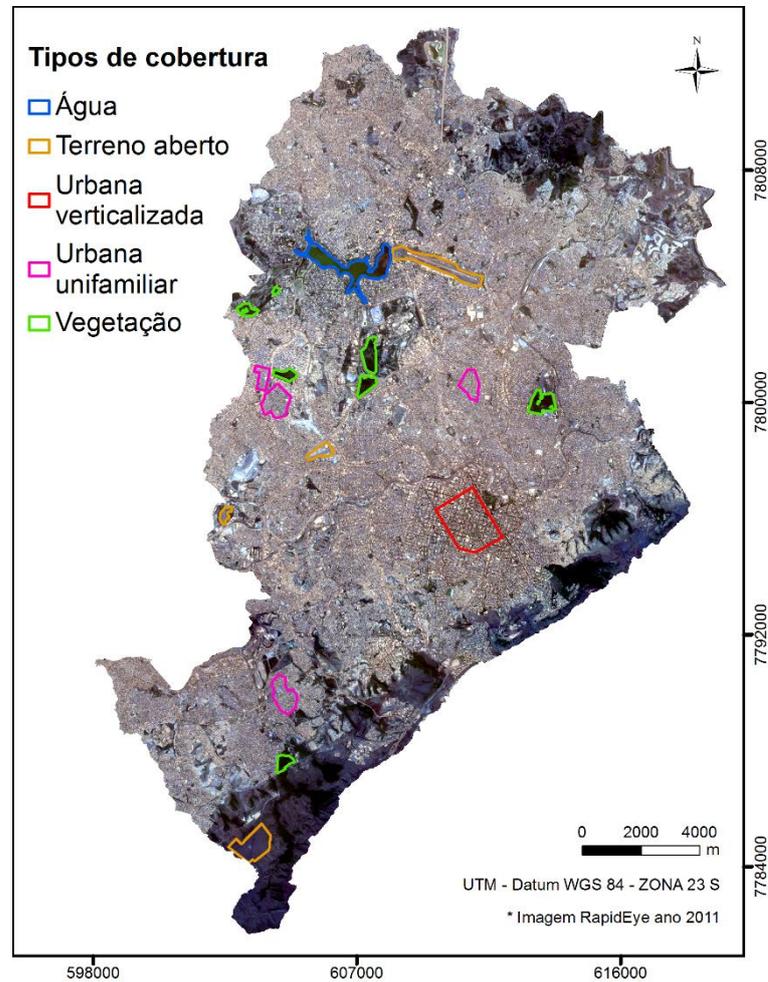
foram utilizadas imagens RapidEye (de 2011), por possuírem maior resolução espacial. A vetorização foi o método escolhido para delimitar os tipos de cobertura do solo. Na delimitação, foram evitadas parcelas pequenas e estreitas para resguardar que áreas de transição entre tipos de cobertura do solo fossem incorporadas à avaliação, como reforço, foi aplicado ainda um *buffer* interno às áreas vetorizadas.

Inicialmente, o método proposto para identificar os tipos de cobertura do solo era a classificação de imagens. No entanto, erros referentes ao algoritmo de classificação seria um aspecto de propagação de erros que afetaria, de alguma forma, a avaliação. Havia também a proposta de trabalhar com todas as amostras disponíveis na área de estudo, mas, tendo em vista que a área de estudo é uma área urbana densamente povoada, seria desproporcional comparar as amostras de área urbana com as amostras, por exemplo, de solo exposto, que são escassas. Determinou-se, então, que o tamanho das amostras para as classes de cobertura do solo deveria ser semelhante. Por esses motivos, a decisão de se trabalhar com vetorização e amostras dos conjuntos de dados, e não com classificação de imagens e com todas as áreas de cada tipo de cobertura definido. A quantidade de amostras por classe de cobertura do solo foi apresentada na Tabela 4 da seção 3.4.

Tendo em vista que a área de estudo é uma região intensamente urbanizada e, portanto, heterogênea quanto aos tipos de elementos que a compõem, é inevitável que as áreas delimitadas para cada tipo de cobertura contenham alguma característica de classes em que não foram enquadradas.

Na Figura 18, é mostrada a localização das áreas selecionadas para a avaliação quanto ao tipo de cobertura do solo.

Figura 18: Localização das áreas definidas para avaliação quanto ao tipo de cobertura do solo sobrepostas a imagem RapidEye de 08/09/2011 em composição RGB 123.



Selecionadas as amostras referentes a cada tipo de cobertura do solo, foram traçados perfis topográficos sobre os tipos de cobertura e calculados os valores de RMSE para as classes definidas. Os resultados seguem adiante.

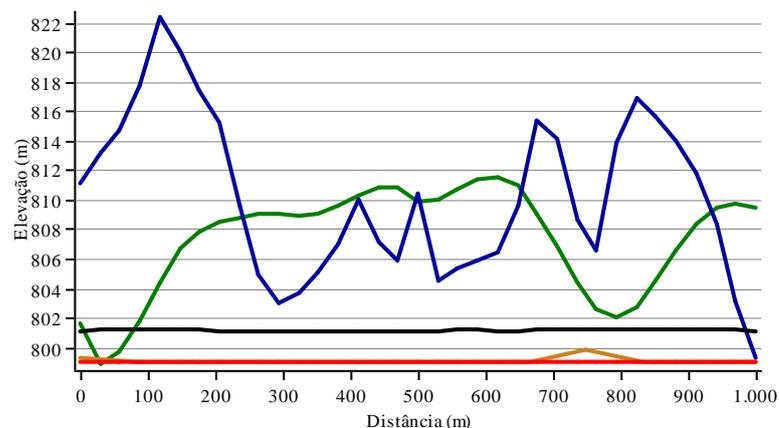
4.7.1 Água

No início das avaliações, conforme já citado na secção 4.1, as amostras referentes aos corpos d'água foram omitidas das avaliações até agora apresentadas neste trabalho. Os motivos que levaram a essa exclusão foram embasados em Lang e Welch (1999) e Farr *et al.* (2007) que abordaram a limitação dos dados ASTER GDEM e SRTM na representação de superfícies de água. Além disso, foi observado que os valores de RMSE do ASTER GDEM

para a classe de relevo plano, se considerando os pontos referentes aos corpos d'água no cálculo, era igual a 7,05 m; e se não considerados esses pontos no cálculo, o valor de RMSE caía para 5,51 m. A água se classifica na classe de relevo plano devido às poucas variações na elevação. Em NASA e METI (2009), também foi observado aumento dos erros altimétricos quando consideradas feições de água, gelo e neve, e diminuição dos erros altimétricos quando não consideradas essas feições. Já no caso do SRTM, essas variações de RMSE não foram identificadas na presente pesquisa, pois a máscara aplicada aos corpos d'água no tratamento dos dados SRTM pelos produtos desses dados (FARR *et al.*, 20007) gerou uma aproximação eficaz da realidade para os corpos d'água da área de estudo. Essas interpretações foram consideradas em relação ao corpo d'água Lagoa da Pampulha, que possui grandes dimensões (183 hectares) na área de estudo. Essas observações relatadas se devem ao diferente comportamento do ASTER, SRTM e LIDAR perante a interação com a superfície da água e aos diferentes processamentos que receberam.

Na Figura 19, são mostrados os perfis topográficos traçados sobre a Lagoa da Pampulha, em uma mesma localização (coordenadas de partida E=605691,93 m; N=7805001,28 m e coordenadas de chegada E=606597,99 m; N=7804578,14 m), e na Tabela 16 são apresentados os valores de RMSE encontrados entre os modelos avaliados e o modelo de referência para esse tipo de cobertura. Os perfis topográficos e valores de RMSE comparam e exprimem o comportamento dos MDEs na superfície da água.

Figura 19: Perfis topográficos para cobertura do solo tipo água.



Legenda: — LIDAR; — ASTER GDEM v2; — SRTM v3; — TOPODATA; — SRTM v2

Tabela 16: RMSE (m) para cobertura do solo do tipo água.

RMSE (m)				
Tipo de cobertura	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
Água	14,03	3,19	6,54	3,42

O MDE LIDAR utilizado nesta pesquisa representa informações do comportamento da lâmina d'água, pois na coleta foram utilizados feixes de laser vermelho (infravermelho, com comprimento de onda de 1.064nm) que, segundo Temba (2008), são refletidos pela superfície da água.

Analisando os perfis da Figura 19 e os valores de RMSE na Tabela 16, é possível observar que as elevações no perfil do ASTER GDEM apresentam uma grande variação em relação ao modelo LIDAR de referência, isso devido à baixa precisão das elevações registradas ocasionada pela pequena quantidade de pares estereoscópicos utilizados para produzir parte das elevações na Lagoa da Pampulha, conforme considerações já feitas na seção 4.1. Segundo Tachikawa *et al.* (2011), os corpos hídricos com área superior a 1 Km² foram identificados e receberam uma máscara. Esse procedimento visou melhorar a precisão do ASTER GDEM para os corpos d'água, de modo que os corpos hídricos que receberam essa máscara devem apresentar um valor de elevação médio constante para todo o corpo hídrico identificado. No entanto, a Lagoa da Pampulha que possui lâmina de água de 1,83 Km² (183 ha) não foi detectada e, portanto, não recebeu essa máscara, possivelmente por apresentar um formato irregular e alguns trechos estreitos de lâmina de água. Um lago com 1, 83 km² e formato regular, provavelmente teria sido detectado e recebido a máscara e, portanto, apresentado valores de elevação mais realistas.

As elevações do SRTM v3 apresentaram maior semelhança com o modelo de referência. No entanto, essas elevações não são próprias do processo de interferometria, elas são resultado de uma máscara com feições de água que foi gerada a partir de processos que utilizaram imagens de satélite e mapas complementares. O comportamento do SRTM v2 é muito semelhante ao do SRTM v3, pois ambos têm a mesma origem, mas resoluções diferentes. O TOPODATA, apesar de ser oriundo do projeto SRTM, apresentou discrepância expressiva em relação ao modelo de referência para superfícies da água. No modelo de referência que deu origem ao TOPODATA (SRTM v1), o espelho de água referente à Lagoa da Pampulha apresenta os mesmos valores de elevação do SRTM v2. Os resultados apresentados pelo TOPODATA na Figura 19 e Tabela 16 demonstram, portanto, que os processos de interpolação aplicados ao TOPODATA, no caso de lâminas d'água, não foram eficientes como a máscara

aplicada sobre os corpos d'água para versão corrigida do seu modelo de origem (SRTM v1) e a versão sucessora, SRTM v2.

Todavia, apesar da semelhança entre os modelos SRTM e o modelo de referência, não é recomendado o uso desse dado para representar superfícies de água. Para esses casos, os satélites SARAL/AltiKa e Envisat, também de uso gratuito, são mais indicados.

4.7.2 Terreno Aberto

A classe de cobertura do solo denominada Terreno Aberto corresponde a áreas sem presença de elementos evidentes sobre o terreno, como edificações e árvores; estão inclusos elementos construídos pelo homem, como pistas de pouso, bem como áreas naturais com vegetação rasteira.

Foi encontrada dificuldade em identificar áreas de terreno aberto em Belo Horizonte que atendessem ao critério de pouca mudança na cobertura do solo. Nas imagens do período analisado, que é de 2000 a 2011 foi identificado um intenso processo de ocupação de espaços urbanos vazios e transformação das edificações já construídas. Porém, foram selecionadas duas áreas que correspondem a pistas de pouso do Aeroporto da Pampulha e Aeroporto Carlos Prates e duas áreas que correspondem a espaços naturais, localizadas uma em planaltos da Serra do Curral e outra no Bairro Califórnia (ver Figura 18).

Na Figura 20, são demonstrados perfis topográficos traçados sobre uma das áreas de cobertura do tipo terreno aberto. Para fins de comparação, os modelos foram traçados sobre uma mesma localização (coordenadas de partida E= 603367,62 m; N= 7784479,50 m e coordenadas de chegada E= 603912,89 m; N= 7785109,68 m). Na Tabela 17, são apresentados os valores de RMSE encontrados entre os modelos avaliados e o modelo de referência para esse tipo de cobertura. Os perfis topográficos e valores de RMSE exprimem o comportamento dos MDEs em cobertura do solo do tipo terreno aberto.

Figura 20: Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo terreno aberto.

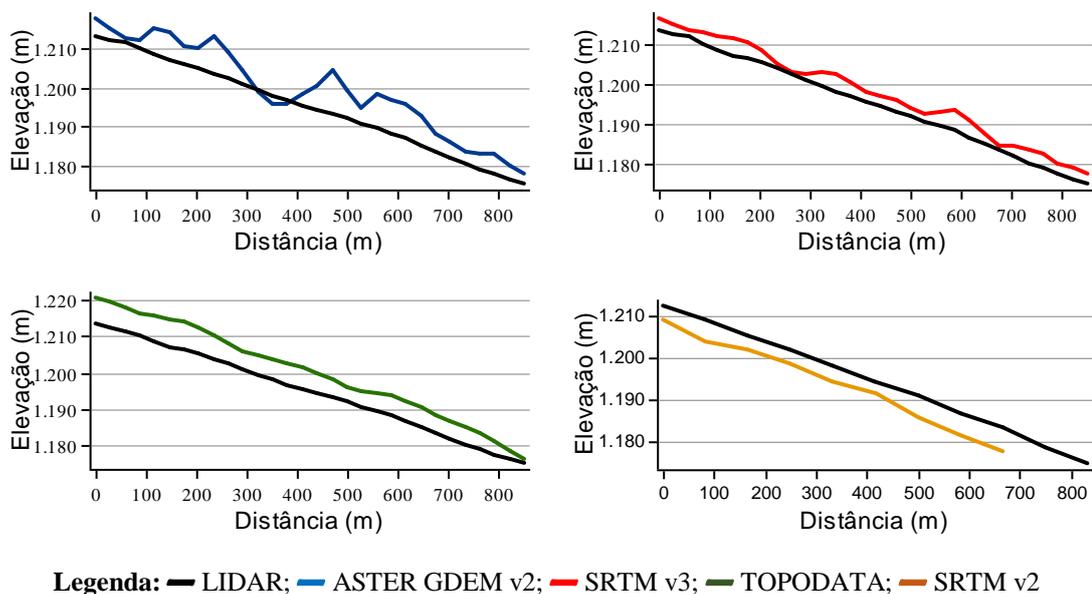


Tabela 17: RMSE (m) para cobertura do solo tipo Terreno Aberto.

RMSE (m)				
Tipo de cobertura	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
Terreno aberto	5,28	3,67	5,82	4,88

Era esperado que a classe de Terreno Aberto apresentasse os menores erros entre as classes de cobertura do solo; no entanto, o RMSE da classe urbana unifamiliar, que será discutida a seguir, apresentou os menores erros. Em todo caso, os perfis topográficos dos modelos avaliados apresentam um bom ajuste em relação ao perfil do modelo de referência para classe Terreno Aberto, se comparados, por exemplo, ao ajustamento dos perfis da classe Urbana Verticalizada, que serão apresentados mais adiante. Foram analisados os fatores que podem ter levado a esse resultado e foi identificado que as amostras de terreno aberto selecionadas sobre um planalto da Serra do Curral influenciaram fortemente os resultados, provavelmente devido à altitude do local. Em exemplo, no caso do ASTER GDEM, 66% dos pontos amostrais do tipo de cobertura terreno aberto que apresentaram resíduos maiores que 100 metros estão localizados na área selecionada sobre o referido planalto e não nas outras 3 áreas de terreno aberto definidas. Autores como Ludwig e Schneider (2006) e Luana, Houa e Wang (2015) também identificaram influência da altitude na precisão dos MDEs.

Os menores RMSE em termos de precisão vertical para a classe Terreno Aberto, considerando as quatro áreas selecionadas, ocorreu na seguinte ordem: SRTMv3<ASTER GDEM<TOPODATA<SRTM v2.

4.7.3 Urbana Unifamiliar

A classe denominada Urbana Unifamiliar contém construções que, independente do uso, possuem em maioria 1 ou 2 pavimentos; elementos como praças, piscinas e arruamentos, estacionamentos e veículos também podem estar presentes. Foram selecionadas quatro áreas extraídas de parcela dos bairros: Alípio de Melo, Conjunto Celso Machado, Renascença, Araguaia e Milionários (ver Figura 18).

Na Figura 21, são demonstrados perfis topográficos traçados sobre uma das áreas de cobertura definidas como do tipo urbana unifamiliar. Para fins de comparação, os modelos foram traçados sobre uma mesma localização (coordenadas de partida E= 604770,40 m; N= 7789556,04 m e coordenadas de chegada E= 604287,61 m; N= 7790431,78 m). Na Tabela 18, são apresentados os valores de RMSE encontrados entre os modelos avaliados e o modelo de referência para esse tipo de cobertura. Os perfis topográficos e valores de RMSE exprimem o comportamento dos MDEs em cobertura do solo do tipo urbana unifamiliar.

Figura 21: Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo urbana unifamiliar.

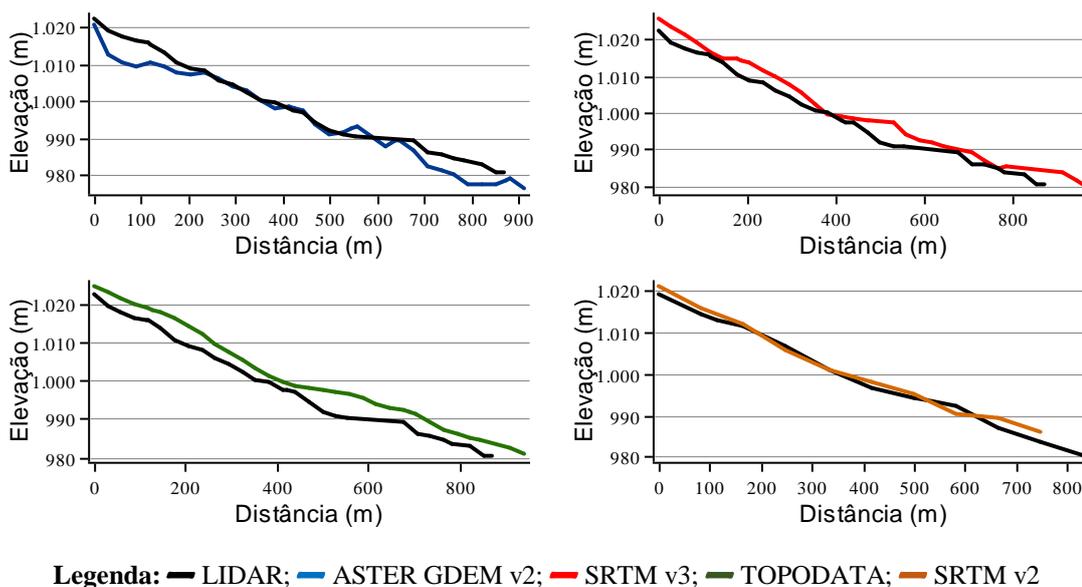


Tabela 18: RMSE (m) para cobertura do solo do tipo urbana unifamiliar.

RMSE (m)				
Tipo de cobertura	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
Urbana unifamiliar	4,47	2,54	3,71	4,74

Os perfis expostos e valores de RMSE apresentam resultados satisfatórios para representação de uma área com tantos elementos e variações de elevação. Ludwig e Schneider (2006), que também avaliaram a relação entre os erros observados no modelo SRTM e a classe urbana de cobertura do solo, encontraram erros altimétricos menores que o esperado para essa classe; no entanto, os autores esclareceram que a área utilizada corresponde mais significativamente a habitações espaçosas e a arruamentos do que a altos prédios. As áreas selecionadas no presente trabalho, como do tipo urbana unifamiliar, apresentam semelhanças com a área urbana definida por Ludwig e Schneider (2006) e destoam da classe Urbana Verticalizada também definida nas avaliações aqui propostas.

Para a classe de cobertura do solo Urbana Unifamiliar, o menor erro dos modelos em relação ao modelo de referência se deu na seguinte ordem: SRTMv3<TOPODATA<ASTER GDEM<SRTMv2. Destaca-se o melhor desempenho do TOPODATA em relação ao ASTER GDEM para essa classe de cobertura. Ressalta-se ainda que, em relação ao comportamento observado para classe Urbana Verticalizada apresentada no item seguinte, é notório o melhor ajuste dos modelos avaliados em relação ao modelo de referência para a classe Urbana Unifamiliar.

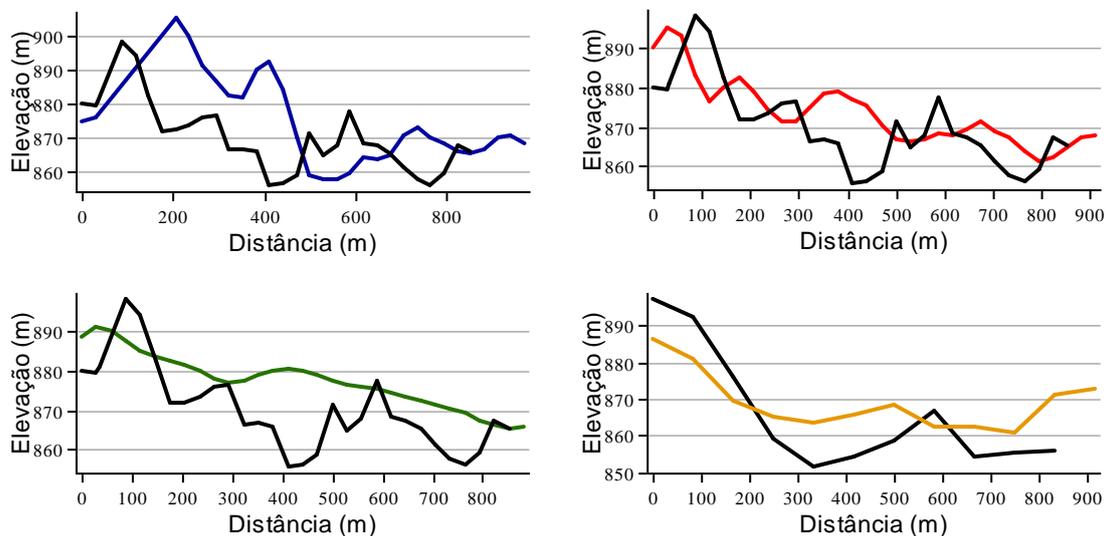
4.7.4 Urbana Verticalizada

Esta classe é composta por edificações verticalizadas, algumas com até 120 metros de altura, e elementos como praças, piscinas e arruamentos, estacionamentos e veículos estão presentes. A área selecionada está localizada entre os bairros Centro, Santo Agostinho, Boa Viagem, Lourdes e Savassi (ver Figura 18).

Na Figura 22, são demonstrados perfis topográficos traçados sobre a área definida como urbana verticalizada. Os perfis para os modelos foram criados em uma mesma localização (coordenadas de partida E=610944,31 m; N=7797071,14 m e coordenadas de chegada E=610708,59 m; N=7796099,32 m). Na Tabela 19, são apresentados os valores de RMSE encontrados entre os modelos avaliados e o modelo de referência para esse tipo de cobertura.

Os perfis topográficos e valores de RMSE exprimem o comportamento dos MDEs no tipo de cobertura urbana verticalizada.

Figura 22: Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo urbana verticalizada.



Legenda: — LIDAR; — ASTER GDEM v2; — SRTM v3; — TOPODATA; — SRTM v2

Tabela 19: RMSE (m) para cobertura do solo tipo urbana verticalizada.

RMSE (m)				
Tipo de cobertura	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
Urbana verticalizada	8,972	8,912	9,171	16,28

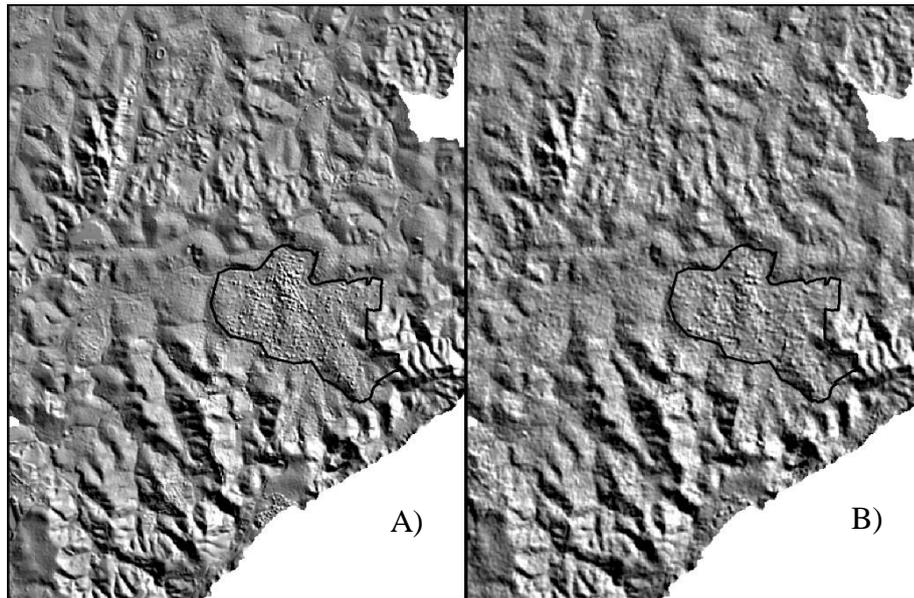
Os resultados apontam grandes discrepâncias entre os modelos avaliados e o modelo de referência para esse tipo de cobertura do solo. Esse é um resultado esperado, devido à heterogeneidade de elementos existente nesse tipo de cobertura; prédios menores que a resolução do pixel da imagem influenciam de forma negativa o valor da média dos elementos contidos na área desse pixel. Os resultados obtidos para esta classe corroboram com Chrysoulakis *et al.* (2011), que avaliaram áreas com diferentes características e encontraram os maiores valores de RMSE para área urbana. Já Ludwig e Schneider (2006), que avaliaram a precisão altimétrica do MDE SRTM banda X de arco de 1 segundo, não encontraram o erro mais significativo para o tipo de cobertura urbana; no entanto, os autores ressaltam que área em que as amostras foram selecionadas corresponde mais significativamente a habitações espaçadas e a arruamentos do que a prédios altos. Com isso, é importante notar o diferente comportamento entre as duas classes de cobertura urbana definidas e observar que as

edificações verticalizadas influenciam fortemente a precisão altimétrica dos modelos, enquanto zonas urbanas com construções em maioria de 1 a 2 pavimentos têm impacto bem menos significativo.

Analisando a Figura 22 e Tabela 19, notamos que os erros entre os modelos de arco de 1 segundo foram próximos; ainda assim, a diferença de erros observados nos modelos se deu na seguinte ordem de melhor precisão: SRTMv3<ASTER GDEM<TOPODATA<SRTM v2. É possível observar uma maior suavização dos perfis TOPODATA e SRTM v2, isso devido ao método de interpolação aplicado e à menor resolução espacial, respectivamente.

Farr *et al.* (2007) relatam que alguns objetos construídos pelo homem podem ser identificados nas imagens SRTM. Segundo Gamba, Dell'Acqua e Houshmand (2002), é possível encontrar edifícios altos nas imagens SRTM; no entanto, é quase impossível obter dados quantitativos a respeito; algoritmos eficientes de extração de MDE interferométricos poderiam oferecer algumas informações a respeito das medidas dos edifícios, melhorando a usabilidade dos produtos SRTM para áreas urbanas. Na imagem da área de estudo, a região com maior concentração de edificações verticalizadas foi identificada nas imagens SRTM v3 pela diferença na microtextura do relevo e com base no conhecimento prévio a respeito da área. Nos demais modelos, a identificação não foi evidente. Na Figura 23, é representado o relevo sombreado do MDE LIDAR e o relevo sombreado do MDE SRTM v3 em sobreposição a um limite vetorial que indica uma área com intensa verticalização nas proximidades e no centro de Belo Horizonte. Para comparação visual, as imagens foram fixadas na escala de 1:200.000 e receberam o mesmo tipo de contraste.

Figura 23: Identificação de área com edificações verticalizadas.



Legenda: A) LIDAR; B) SRTM v3

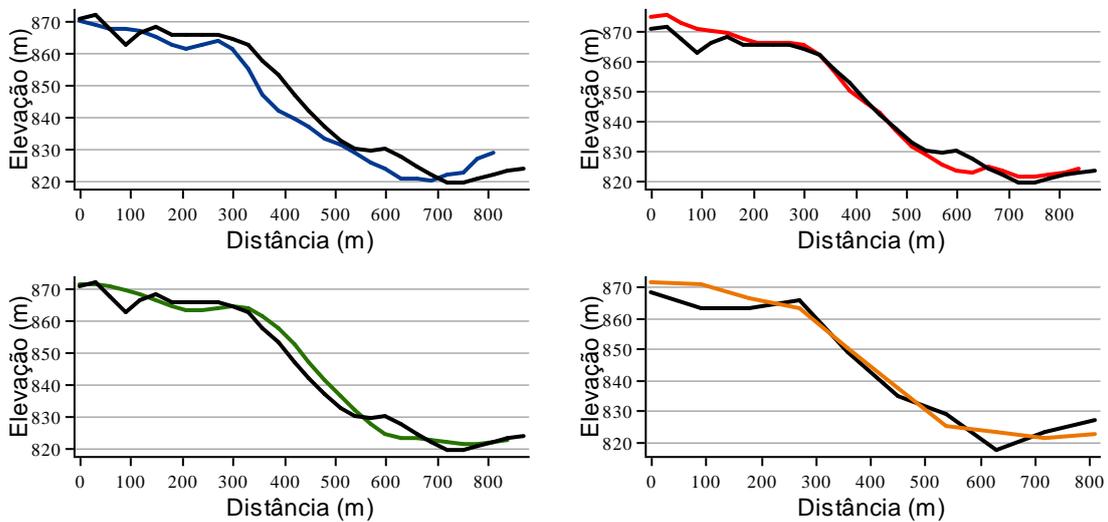
4.7.5 Vegetação

As áreas selecionadas são pertencentes a trechos do Zoológico de Belo Horizonte, da Estação Ecológica da UFMG, do Parque Municipal Ursulina Andrade Mello, do Jardim Botânico da UFMG e do Parque Estadual do Rola Moça (ver Figura 18). São fragmentos de vegetação típica de Matas Semidecíduas e de Cerrado.

Era esperado que a vegetação apresentasse discrepâncias evidentes em relação ao modelo de referência, pois ambos os métodos interferometria e estereoscopia são influenciados pela vegetação. Farr *et al.* (2007), que divulgaram a validação da USGS para os dados SRTM, relatam que o sinal de retorno do radar é influenciado pela vegetação, a estrutura e a densidade das árvores. Kolecka e Kozak (2014) relatam que os valores de RMSE em dados SRTM foram maiores em áreas florestadas. Valeriano (2008), no guia do TOPODATA para utilização de dados geomorfológicos locais, relata que o MDE SRTM é sensível ao efeito dossel das árvores e que essa sensibilidade não é constante, dependendo das condições da cobertura vegetal em cada local na época do sobrevoo da missão SRTM. A equipe de validação ASTER GDEM (2011) relata a influência da vegetação na precisão do modelo, e as diferenças nas características da vegetação de áreas localizadas nos EUA e no Japão é um dos fatores que pode ter contribuído com a diferença da magnitude erros observados para a classe de vegetação.

Na Figura 24, são demonstrados perfis topográficos traçados sobre uma das áreas do tipo cobertura vegetação. Os perfis para os modelos foram criados em uma mesma localização (coordenadas de partida E= 607576,91 m; N= 7801005,36 m e coordenadas de chegada E= 607188,58 m; N= 7801817,27m). Na Tabela 20, são apresentados os valores de RMSE encontrados entre os modelos avaliados e o modelo de referência para esse tipo de cobertura. Os perfis topográficos e valores de RMSE exprimem o comportamento dos MDEs na cobertura do solo do tipo vegetação.

Figura 24: Perfis topográficos em cobertura do solo do tipo vegetação.



Legenda: — LIDAR; — ASTER GDEM v2; — SRTM v3; — TOPODATA; — SRTM v2

Tabela 20: RMSE (m) para cobertura do solo do tipo Vegetação.

RMSE (m)				
Tipo de cobertura	ASTER GDEM	SRTM v3	TOPODATA	SRTM v2
Vegetação	5,06	4,80	6,78	9,00

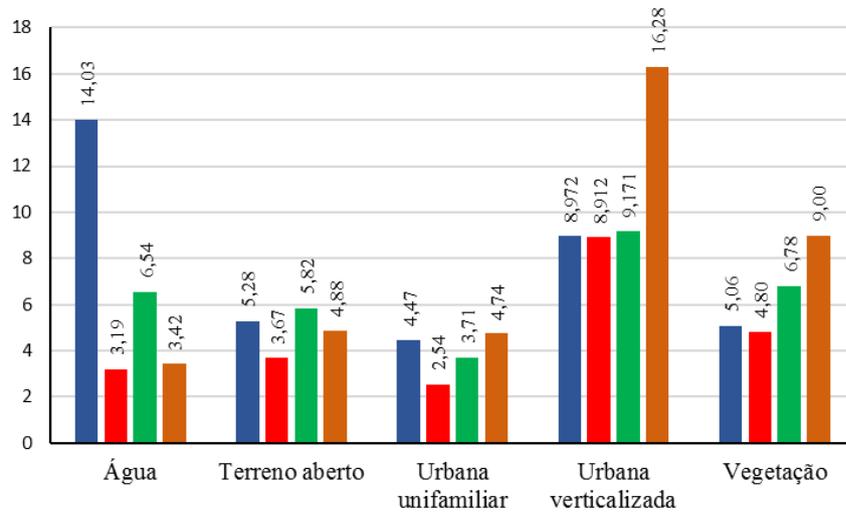
Os erros observados nos modelos avaliados para a classe Vegetação, de acordo com os valores de RMSE apresentados na Tabela 20, ocorreram na seguinte ordem: SRTM v3<ASTER GDEM<TOPODATA<SRTM v2. No entanto, para constatar qual modelo seria mais indicado para representar a vegetação, análises mais profundas seriam necessárias, dentre elas adquirir informações acerca da altura e densidade da vegetação nas áreas em que as amostras foram selecionadas.

Outro fator que impacta a representação das elevações nesse tipo de cobertura é o comprimento de onda da banda de coleta do sensor utilizado. No entanto, esse fator não foi analisado nesta avaliação, mas sabe-se que comprimentos de ondas maiores penetram mais na vegetação e que comprimentos de onda menores penetram menos, de modo que, dependendo do comprimento de onda utilizado, a representação pode estar relacionada ao topo das árvores, ao tronco das árvores ou ao solo existe abaixo da vegetação (FARR *et al.*, 2007). Com isso, o sinal de radar do SRTM banda C, coletado em comprimento de onda de 5,6 cm, pode, por exemplo, penetrar mais na vegetação do que o sinal de radar do SRTM banda X de comprimento de onda igual a 3,1 cm. Segundo Timbó Elmiro (2006), a reflexão utilizando comprimentos de ondas de radar na banda P (comprimento de onda de 75 cm) efetua-se ao nível do solo, representando o terreno (MDT), e a reflexão utilizando banda X reflete o dossel da vegetação, todavia, a densidade da floresta interfere nessa reflexão.

Seguindo este raciocínio, o ASTER em função do sensor VNIR que opera na região do espectro visível e infravermelho próximo, em comprimentos de onda entre 0,52 μm e 0,86 μm , representaria o topo das árvores. No entanto, a relação entre o comprimento de onda, penetrabilidade nos alvos e o impacto na elevação representada nos dados ASTER GDEM é algo que precisa de uma investigação específica e profunda, já que a elevação nos dados ASTER GDEM é determinada pela estereoscopia de pontos correlacionados identificados em cenas diferentes, e não pela distância do sinal de retorno identificado pelo sensor, como nos dados SRTM.

Para comparação dos resultados obtidos para os diferentes tipos de cobertura, na Figura 25, foram sumarizados os valores de RMSE para as classes de cobertura do solo apresentados nos tópicos anteriores. Percebe-se que, para representar todas as classes de cobertura do solo, o SRTMv3 (1" ou aproximadamente 30 metros) apresentou erros menores, enquanto o SRTMv2, em função da resolução (3" ou aproximadamente 90 metros), apresentou erros maiores para todas as classes de cobertura do solo. Na classe Urbana Verticalizada, todos os dados apresentaram grandes discrepâncias em relação ao modelo de referência, principalmente o SRTM v2. Os erros altimétricos nos MDEs avaliados são influenciados pelas classes definidas na seguinte ordem: Urbana Verticalizada > Água (em consequência dos resultados do ASTER GDEM) > Vegetação > Terreno Aberto (com ressalva a respeito da altitude) > Urbana Unifamiliar.

Figura 25: RMSE (m) para as classes de cobertura do solo.



Legenda: — LIDAR; — ASTER GDEM v2; — SRTM v3; — TOPODATA; — SRTM v2

4.8 Análise Espacial dos Erros

A análise espacial dos erros foi realizada em ambiente SIG para os modelos SRTM v3 e ASTER GDEM que apresentaram menores erros altimétricos nas avaliações propostas nesta pesquisa. Em formato raster, os modelos avaliados foram subtraídos dos modelos de referência para toda área de estudo (Belo Horizonte). Os atributos das imagens resultantes foram reclassificados de acordo com 3 classes: erros menores que -16 metros, erros entre -16 e 16 metros e erros maiores que 16 metros. O padrão 16 metros foi escolhido por ser a precisão vertical reivindicada pela equipe de validação do MDE SRTM, enquanto que a precisão reivindicada pela equipe de validação dos dados ASTER GDEM é de 20 metros. No entanto, para efeitos de comparação entre os modelos, também foi utilizado o padrão de 16 m.

As classes de erros menores que 16 metros e maiores que 16 metros foram consideradas como o erro observado nos modelos. Essas classes foram então convertidas para formato vetorial feição tipo polígono. Para cada pixel com erros menores que 16 m e maiores que 16 m, foi gerado um polígono, e os polígonos foram posteriormente mesclados e essas duas classes unidas.

A representação espacial dos erros observados nos modelos foi sobreposta a mapas de declividade gerados a partir de seu próprio MDE. As classes de declividade estão de acordo com EMBRAPA (1979), conforme pode ser visto na Figura 26 e na Figura 27. Foi constatado que em ambos os modelos há uma relação dos erros com as áreas de maior declividade, embora

essa relação seja mais notória no SRTM. As áreas urbanas verticalizadas, como a localizada na região centro de Belo Horizonte, concentram grande quantidade de erros em ambos os modelos. Pode ser percebida também a diferença na representação da lâmina de água da Lagoa da Pampulha no SRTM e no ASTER GDEM.

Figura 26: Representação da distribuição espacial dos erros altimétricos no modelo ASTER GDEM em relação à declividade.

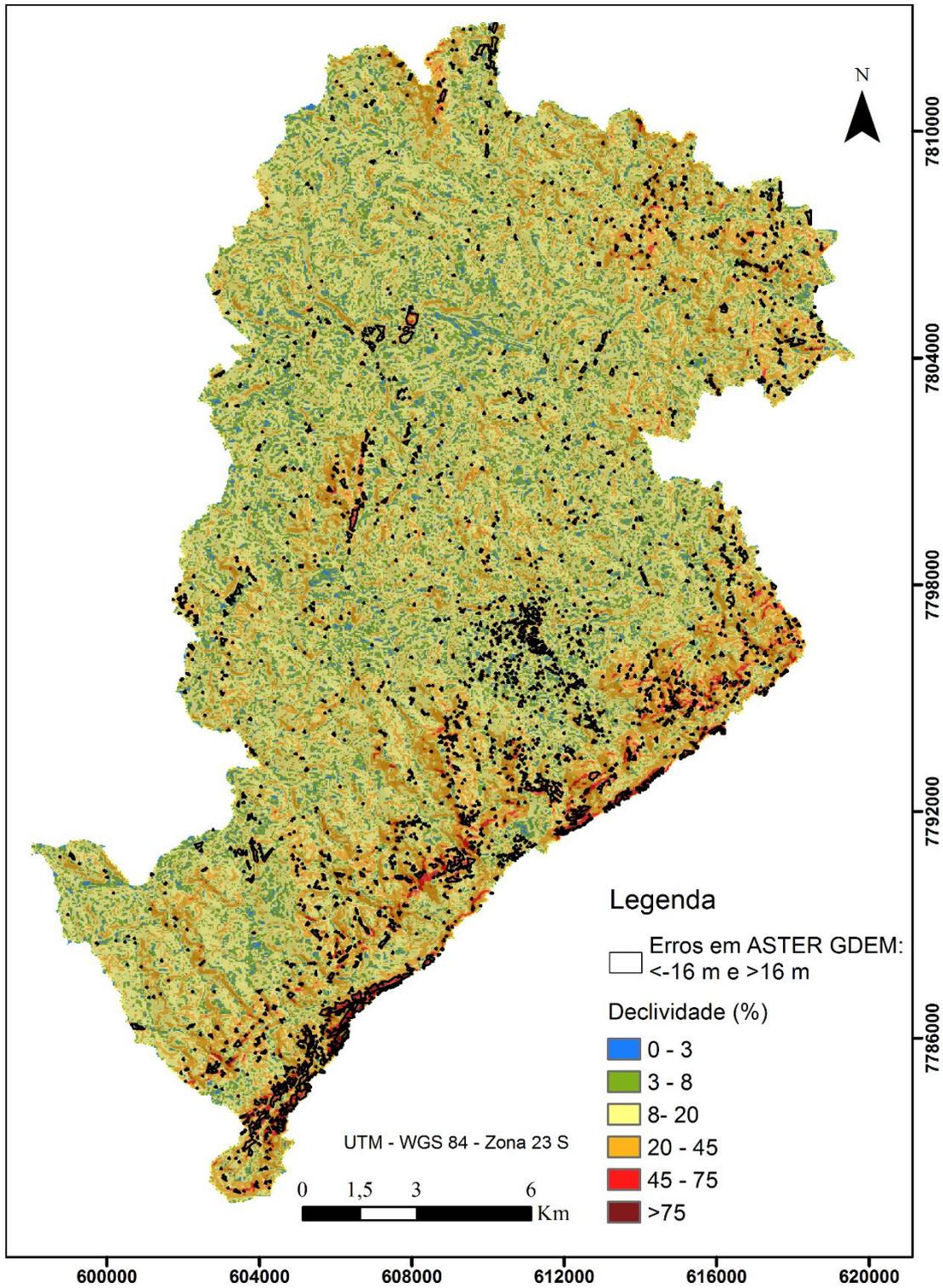
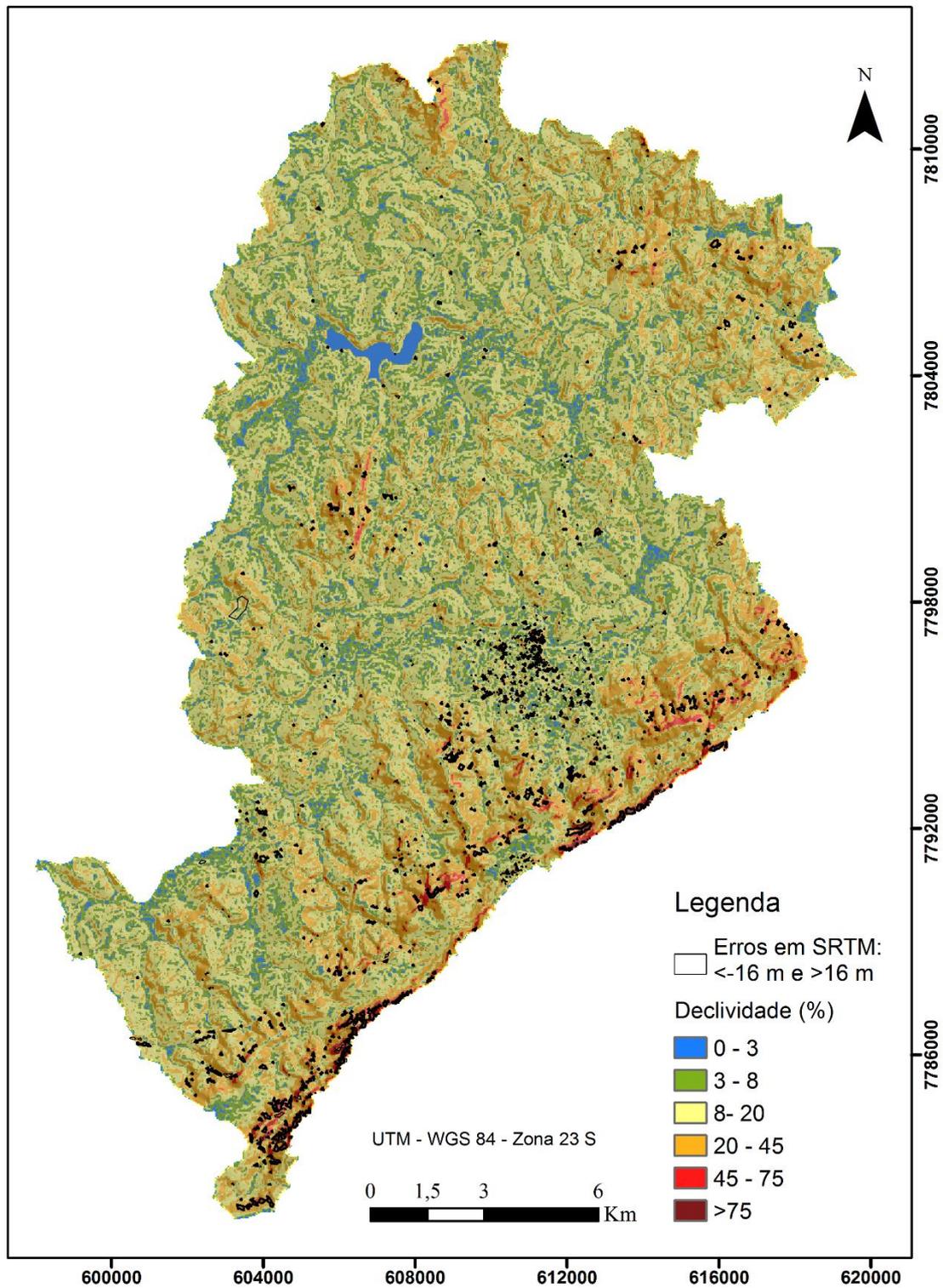


Figura 27: Representação da distribuição espacial dos erros altimétricos no modelo SRTM v3 (resolução espacial de arco de 1 segundo) em relação a declividade.

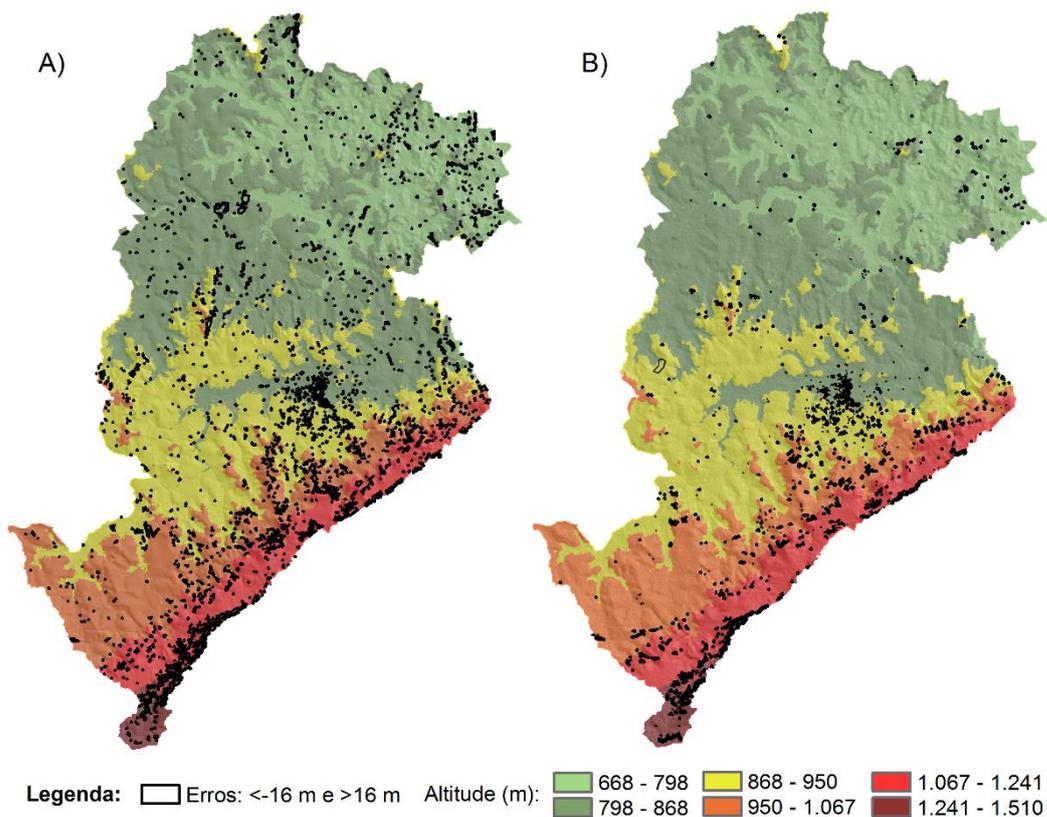


Analisando a distribuição espacial dos erros altimétricos dos modelos ASTER GDEM e SRTM v3 sobre as classes de declividade do relevo, observa-se que no SRTM, os

erros observados estão intimamente relacionados às áreas de maior declividade, principalmente as áreas de relevo escarpado. No ASTER GDEM, também é observada a relação entre erros altimétricos e declividade; no entanto, a distribuição dos erros no modelo ASTER GDEM apresenta um padrão disperso na área de estudo. Essas observações são condizentes com as já observadas por Luana, Houa e Wang (2015), que utilizando análise de regressão, identificaram nos modelos SRTM poder de explicação da declividade de 70,2%; no modelo ASTER GDEM v1, a declividade explicou 64.8% e já no modelo ASTER GDEM v2 a declividade teve pouco poder explicativo.

Luana, Houa e Wang (2015) também identificaram que a altitude tem maior relação com os erros altimétricos no modelo SRTM, explicando 59,2 % dos erros observados; o ASTER GDEM v1 explica 44,6 % e o ASTER GDEM v2 também teve pouco poder explicativo. No presente trabalho, uma maior relação entre altitude e as ocorrências de erros altimétricos foi percebida no SRTM; já no ASTER GDEM, o padrão disperso dos erros novamente não deixa clara essa relação (Figura 28).

Figura 28: Representação espacial da distribuição dos erros altimétricos em relação à altimetria.



Na Figura 29 e na Figura 30, é detalhada a distribuição espacial dos erros nos modelos SRTM v3 e ASTER GDEM. Foram detalhadas as áreas que apresentaram maior concentração de erros. No zoom 1, os erros localizados na Lagoa da Pampulha; no zoom 2, os erros localizados na região centro que possui altos edifícios; no zoom 3, os erros localizados em zonas de relevo montanhoso e escarpado.

Figura 29: Erros altimétricos observados no MDE SRTM v3 (resolução espacial de arco de 1 segundo).

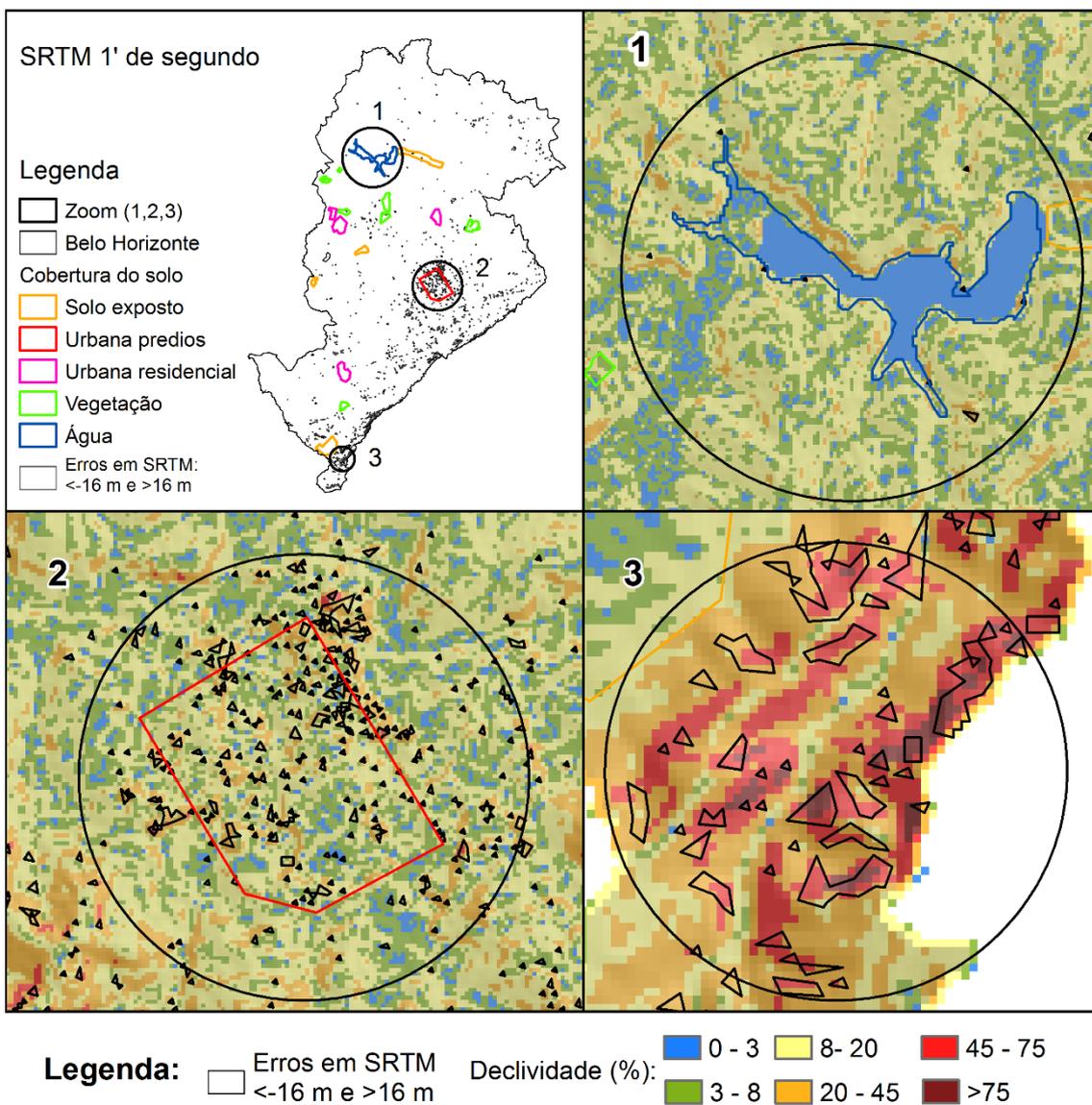
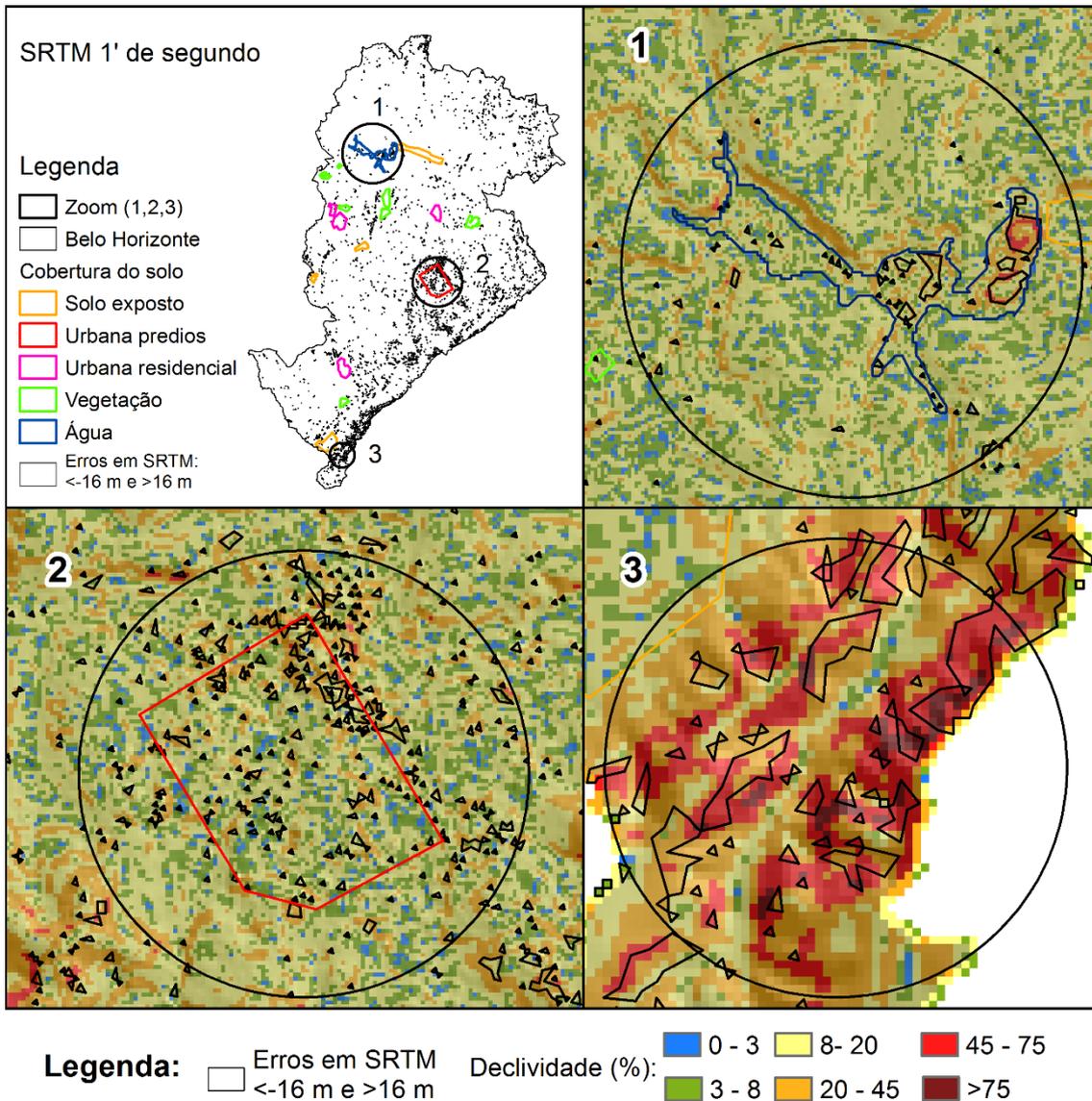


Figura 30: Erros altimétricos observados no MDE ASTER GDEM.



No zoom 1 da Figura 29 e da Figura 30, o limite vetorial em azul corresponde à lâmina de água da Lagoa da Pampulha delimitada com a vetorização das imagens RapidEye de 2011; essa foi também a área selecionada para representar as amostras do tipo de cobertura água.

Pode ser verificado no zoom 1 da Figura 29, que a máscara aplicada aos dados SRTM para melhoramento da representação dos corpos d' água conseguiu detectar a área da lagoa e representar as elevações com um valor médio constante. Todavia, a área foi subestimada, além de que alguns erros menores que 16 m e maiores que 16 metros podem ser identificados sobre o limite que delimita a área da Lagoa. Vale lembrar que, conforme já

abordado anteriormente, os sensores de radar não representam elevações em superfícies lisas como a de um lago, devido ao baixo ou nenhum sinal de retorno recebido na direção do retroespalhamento e que, por esse motivo, o USGS utilizou um algoritmo para detectar lâminas de água e aplicar aos dados SRTM uma máscara com um valor de elevação constante para cada lâmina de água identificada.

No zoom 1 da Figura 30, pode ser verificado que, diferente do que aconteceu com o SRTM, o algoritmo aplicado para detecção de lâminas de água e aplicação de máscara de elevações do ASTER GDEM não conseguiu detectar a área da Lagoa da Pampulha. Essa área, portanto, é representada com resultados próprios da correlação estereoscópica das cenas ASTER, que conforme já abordado nas secções 4.1 e 4.7.1, utilizou uma baixa quantidade de pares estereoscópicos (menor que cinco) para gerar as elevações, provavelmente devido à dificuldade de identificação de correção de pontos homólogos nesse tipo de superfície. No zoom 1 da Figura 30, os polígonos maiores correspondem justamente às áreas onde foram utilizadas quantidade de pares estereoscópicos menor que 5. Conforme NASA e METI (2011), com a utilização de pares estereoscópicos menor que 5, os erros altimétricos nos MDE ASTER GDEM tendem a aumentar.

No zoom 2 da Figura 29 e da Figura 30, são apontados os erros altimétricos menores que 16 metros e maiores que 16 metros, encontrados em uma área com altos edifícios. Os erros são significativos tanto para o ASTER GDEM como para o SRTM v3. Conforme foi abordado na avaliação da classe de cobertura do solo urbana verticalizada, essas áreas tendem a apresentar erros significativos devido à heterogeneidade de elementos encontrados e variações de elevação encontradas nessas áreas.

No zoom 3 da Figura 29 e da Figura 30, a localização espacial dos erros menores que 16 metros e maiores que 16 m, tem relação com as classes de relevo mais íngremes, principalmente com as áreas de declividade acima de 75% (relevo escarpado), conforme resultados já obtidos na avaliação das classes de relevo na secção 4.6.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a precisão altimétrica do MDEs SRTM banda C de resolução espacial de arco de 1 segundo (SRTM v3), ASTER GDEM v2, TOPODATA e SRTM banda C de resolução espacial de arco de 3 segundos (SRTM v2). Essa avaliação foi feita a partir de uma abordagem sistêmica que considera os Modelos Digitais de Elevação como um produto cuja precisão da elevação registrada é influenciada por um conjunto de variáveis. Desse modo, foram investigados os métodos de aquisição dos modelos, os processamentos recebidos e a influência das classes de declividade do relevo: plano, suave ondulado, ondulado, montanhoso e escarpado, bem como os tipos de cobertura do solo: água, urbana unifamiliar, urbana verticalizada, terreno aberto e vegetação.

Como referência, foram utilizados dados provenientes de tecnologia *Light Detection and Ranging* (LIDAR), com precisão altimétrica da ordem de 25 cm. A aplicação ocorreu em uma área urbana densamente povoada (Belo Horizonte – MG).

A avaliação levou em consideração aspectos físicos do sensoriamento remoto e utilizou os métodos de análise de histogramas, perfis topográficos, índice de correlação, análise de regressão, RMSE, análise da distribuição estatística e espacial dos erros, bem como Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD do Brasil. Foi dada ênfase ao MDE SRTM v3 (resolução espacial de 1" ou aproximadamente 30 metros) disponibilizado em setembro de 2014, que constitui uma inovação valiosa para trabalhos em Geociências.

Os testes de correlação apontaram existência de alta correlação positiva entre os modelos avaliados e o modelo de referência. A análise de regressão demonstrou que o modelo de referência é adequado para descrever o modelo ASTER GDEM v2 em 99,73%, o modelo SRTM v3 em 99,84%, o modelo TOPODATA em 99,54% e o modelo SRTM v2 em 99,33%. O modelo que apresentou menores erros para representação da área de estudo, se considerada integralmente, foi o SRTMv3 (RMSE = 4,95m), seguido ASTER GDEM (RMSE = 6,44m), TOPODATA (RMSE = 8,90 m) e por último o SRTM v2 (RMSE = 10 m).

A análise da distribuição da frequência estatística dos erros apontou ganho do SRTM v3 em relação aos demais modelos. A classe de erros entre -5,81 m e 5,35 m, agrupou 80,69% dos erros no SRTMv3, sendo esse um indicativo de qualidade do modelo; enquanto o ASTER GDEM, agrupou 66,11% e o TOPODATA 62,86% dos erros neste intervalo. No caso do SRTMv2, a classe de erros entre -2,47 e 10,82 agrupou 47% dos resíduos.

A determinação de um erro grande ou pequeno está relacionada ao objetivo da utilização dos MDEs e à escala de mapeamento aplicada. Ambos os modelos são compatíveis com a escala de 1:250.000 com padrão classe A. Na escala de 1:100.000, os modelos ASTER GDEM e SRTM v3 são classificados como padrão classe A e TOPODATA e SRTM v2 com padrão classe B. Na escala de 1:50.000, o SRTM v3 foi classificado como classe B, o ASTER GDEM como classe C, o TOPODATA como classe D e o SRTM v2 não obteve nenhuma classificação nessa escala.

Quanto à análise da declividade sobre a precisão altimétrica, foi constatado que em ambos os modelos avaliados, os erros altimétricos crescem conforme aumenta a declividade. Para a representação de relevos planos, suave ondulados, ondulados e montanhosos, o SRTM v3 apresentou erros altimétricos menores; para representação de relevo escarpado, o ASTER GDEM mostrou-se mais vantajoso.

A avaliação quanto aos tipos de cobertura do solo demonstrou que os métodos estereoscopia e interferometria não são adequados para representar corpos d' água; para esses casos, os satélites SARAL/AltiKa e Envisat, também de uso livre, podem ser mais indicados. A classe de cobertura do solo do tipo urbana verticalizada foi a que apresentou os maiores erros altimétricos e a classe urbana unifamiliar os menores. Era esperado que a classe terreno aberto apresentasse os menores erros, no entanto, amostras coletadas em planaltos (altitude elevada) influenciaram os resultados obtidos para esta classe. Também foi observada a influência da vegetação na precisão altimétrica dos modelos avaliados.

A representação da distribuição espacial dos erros altimétricos nos modelos foi importante para visualizar a dispersão ou concentração dos erros e onde eles ocorrem. Foi constatado que em ambos os modelos há uma relação dos erros com as áreas de maior declividade e de maior altitude, embora essa relação seja mais notória no SRTM. As áreas urbanas verticalizadas, como a localizada na região centro de Belo Horizonte, concentram grande quantidade de erros em ambos os modelos. Pode ser percebida também a diferença na representação da lâmina de água da Lagoa da Pampulha no SRTM e no ASTER GDEM.

Além dos fatores acima citados, a verificação das características climatológicas da área de estudo é outro fator que pode contribuir para obtenção de melhores resultados em uma aplicação. Em regiões muito chuvosas, o SRTM ou TOPODATA podem ser mais vantajosos por serem obtidos por um sistema ativo e que, diferentemente do ASTER GDEM, não é afetado pela interferência de nuvens.

Algumas ressalvas devem ser feitas com relação à avaliação proposta nesta pesquisa. Primeiro, com relação aos datums verticais utilizados, ASTER GDEM v2 e SRTM v3 e SRTM v2 (*datum* vertical EGM96) e LIDAR (*datum* vertical Imbituba). Segundo, com relação à diferença entre as datas de aquisição dos modelos avaliados e o modelo de referência que contribui com um erro desconhecido para o aumento dos resíduos encontrados entre eles (com relação a essa ressalva, a avaliação quanto aos tipos de cobertura do solo foi menos afetada). As datas de aquisição dos dados SRTM e LIDAR foram, respectivamente, fevereiro de 2000 e novembro de 2007. O ASTER GDEM foi gerado a partir de múltiplas cenas do satélite ASTER, com datas não divulgadas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo de métodos que visem à otimização dos modelos de distribuição gratuita provenientes de sensoriamento remoto. Uma sugestão seria subtrair o MDE SRTMv3 pelo modelo ASTER GDEM e identificar e omitir as áreas com diferenças muito discrepantes. Posteriormente, omitir também áreas de relevo escarpado no SRTMv3, e então utilizar um método de interpolação a ser determinado para preencher esses dois tipos de vazios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M.; HOOK, M. **ASTER User Handbook Version 2**. Pasadena: JPL/EROS Data Center/NASA, 1999.

ASPIAZÚ, C.; ALVES, L. M.; VALENTE, F. V. Modelos Digitais de Terrenos Conceituação e Importância. **Boletim de Pesquisa Floresta**, n. 21, p. 27-36, 1990.

BADOLATO, I. S. **Extração de Modelo Digital de Elevações Acelerada em GPU**. 2014. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BECEK, K. Investigation of Elevation Bias of the Srtm C- and X-Band Digital Elevation Models. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing, v. XXXVII, n. Part B1, p. 105-110, 2008.

BEHRENDT, R. Introduction to LiDAR and Forestry, Part 1: A Powerful New 3D Tool for Resource Managers. **The Forestry Source**, v. 17, n. 9, p. 14-15, Setembro 2012.

BENEDETTI, A. C. P. **Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul**. 2010. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BRUBACHER, J. P.; DE OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. 1279-1286. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0366.pdf>>. Acesso em: 11 Novembro 2015.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford University Press, Oxford, 1986.

CAMARGO, F. F. *et al.* Mapeamento Geomorfológico com Imagens Estereoscópicas Digitais do Sensor Aster/Terra. **Revista Geociências**, v. 30, pp. 95-104. 2011.

CHRYSOULAKIS, N. *et al.* **Analysis of ASTER multispectral stereo imagery to produce DEM and land cover databases for Greek islands: The REALDEMS Project**. EU-LAT Workshop on e-Environmen. pp. 411 – 424. 2004.

_____. Validation of ASTER GDEM for the Area of Greece. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 77, n. 2, pp. 157–165. 2011.

COSTA, C. A. G. *et al.* Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 222-230, 2010.

DIAS, M.F. *et al.* Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em Diferentes Configurações Topográficas para Médias e Pequenas Escalas. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 15., 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2011. 4110 – 4117. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0644.pdf>>. Acesso em: 13 Ago. 2015.

DIRETORIA DE SERVIÇOS GEOGRÁFICOS - DSG. **Norma da Especificação Técnica Para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. Brasília. 2015.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 17 fev. 2016

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, Micelânea 1, SNLCS, Rio de Janeiro. 1979. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 17 fev. 2016.

EQUIPE DE VALIDAÇÃO DO DADOS ASTER GDEM v2. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results**. 2011.

FARR, T. G. *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission. **Rev. Geophys.** 2007.

FONSECA, D.N.; CORRÊA, A.C. Uso de MDE na Extração de Lineamentos para Detecção de Reativações Neotectônicas na Bacia do Rio Preto, Serra do Espinhaço Meridional, MG. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 15., 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2011. 3485-3490. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0648.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

FORNELOS, F.L.; NEVES, S.M. Uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados a partir de imagens de Radar Interferométrico (SRTM) na estimativa e perdas de solo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n1, pp. 1808-0936.

FUCKNER, M. A.; FLORENZANO, T. G. E MORAES, E. C. Avaliação altimétrica de modelos digitais de elevação extraídos de imagens ASTER em áreas com configuração topográfica distinta. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 14., 2009, Rio Grande do Norte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. 683-690. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.49/doc/683-690.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

GAMBA, P.; DELL'ACQUA, F.; HOUSHMAND, B. SRTM Data Characterization in Urban Areas. **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**. In: SYMPOSIUM PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION - COMMISSION III - WORKING GROUP II, v. XXXIV, n. 3, pp. 55-58, Graz - Austria, 2002.

GARAFALO, D. F. T.; LIESENBERG, V. Análise comparativa da informação altimétrica presente nos modelos digitais de elevação ASTER GDEM 1 e 2, SRTM e TOPODATA. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 14., 2009, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. 2865-2875. Disponível em:

<<http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.49/doc/683-690.pdf>> .
Acesso em: 10 ago. 2015.

GLOBAL LAND ICE MEASUREMENTS FROM SPACE – GLIMS. **About GLIMS**, 2002. Disponível em: <<http://www.geo.unizh.ch/~kaeueb/glims/glims.html>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

GOROKHOVICH, Y.; VOUSTIANIOUK, A. A. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n. 4, pp. 409–415. 2006. DOI:10.1016/j.rse.2006.05.012.

GUPTA, *et al.* **Validation of SRTM X Band DEM Over Himalayan Mountain**. The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XI-4, ISPRS Technical Commission IV Symposium, 14 – 16 Maio 2014, Suzhou, China. 2014.

HAALA, N.; BRENNER, C. Interpretation of Urban Surface Models Using 2D Building Information. **Computer Vision and Image Understanding**. Vol. 72, N. 2, pp. 204–214, 1998.

HIRANO, A.; WELCHA, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, pp. 356–370. 2003. DOI:10.1016/S0924-2716(02)00164-8.

HUISMAN, O.; BY, R. A. D. **Principles of Geographic Information Systems**. 4. ed. Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009.

IGEO. **Boletim do Instituto Geográfico do Exército**. Lisboa, p. 1-83. 2005. (0872 – 7600).
INPE. TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 05 set. 2016.

KOLECKA, N.; KOZAK, J. Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains. **Pure and Applied Geophysics**. vol. 171, pp. 897–912. 2014. DOI 10.1007/s00024-013-0695-5.

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. Análise Comparativa entre os modelos digitais de elevação. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. 4003 - 4010. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1537.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

LANG, H. R.; WELCH, R. **Aster Digital Elevation Models - Algorithm Theoretical Basis Document**. 1999.

LUANA, S.; HOU, X.; WANG, Y. Assessing the Accuracy of SRTM DEM and ASTER GDEM Datasets For The Coastal Zone Of Shandong Province, Eastern China. **Polish Maritime Research**, v. 22, pp.15-20. 2015. DOI: 10.1515/pomr-2015-0026.

LUDWIG, R. and SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 60, pp. 339-358. 2006. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.

MANFRÉ, L. A.; NÓBREGA, R. A. De A.; QUINTANILHA, J. A. Regional and local topography subdivision and landform mapping using SRTM-derived data: a case study in southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, pp 6457–6475. 2010. DOI: 10.1007/s12665-014-3869-2.

MERCHANT, D.C. **Spacial Accuracy for Large Scale Line Maps**. In: Technical Congress of Surveying and Mapping, 222–231. 1982.

NASA e METI. **ASTER GDEM Readme File – ASTER GDEM Version 1**. NASA EOSDIS Terra Processos DAAC, Recursos USGS Observação da Terra e Ciência (EROS) Center, Sioux Falls, Dakota do Sul. 2009.

_____. **ASTER GDEM Readme File – ASTER GDEM Version 2**. NASA EOSDIS Terra Processos DAAC, Recursos USGS Observação da Terra e Ciência (EROS) Center, Sioux Falls, Dakota do Sul. 2011.

NIKOLAKOPOULOS, K. G; KAMARATAKIS E. K.; CHRYSOULAKIS, N. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. **International Journal of Remote Sensing**. Vol. 27, No. 21, pp 4819–4838. 2006. DOI: 10.1080/01431160600835853.

OLIVEIRA, G.C. **Precisão de Modelos Digitais de Terreno, Mapeamento. Automático de Apps em Topos de Morros e a Eficácia do Novo Código Florestal**. 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2015.

PEREIRA, T. A. J.; NERO, M. A. Análise de Normas de Controle de Qualidade Posicional em Cartografia ao Redor do Mundo: Exemplos Atuais de Alguns Países. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO – SIMGEO. 4., Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2012. 001 – 009. 2012. Disponível em: < https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/Todos_Artigos/085_2.pdf >. Acesso em: 14 dez. 2016.

PINHEIRO, E. D. S. Comparação Entre Dados Altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, Cartas Topográficas e GPS: em uma Área com Relevo Escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 01, p. 1–9, 2006.

PIONTEKOWSKI, V. J. **Modelagem da Dinâmica do Uso e Cobertura da Terra do Estado de Rondônia até 2050**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília – UnB. 2014.

PUTH, M. T. *et al.* Effective use of Pearson’s product-moment correlation coefficient. **Animal Behaviour**, v. 93, pp. 183–189. 2014.

REBELO, R. **Aplicação do INSAR na Geração de Modelos Digitais do Terreno**. 2007. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007. Disponível em: http://enggeoespacial.fc.ul.pt/ficheiros/teses/tese_carla_rebelo.pdf. Acesso em: 04 mar. 2016.

REIS, B.R. et. al. O uso de produtos de Sensoriamento Remoto gratuitos na representação do Relevo – um potencial para a educação. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. 1317 - 1344. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.18.33/doc/1337.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2016.

RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUSA, R. F. Avaliação da Adequação dos Produtos ASTER GDEM no Auxílio ao Mapeamento Sistemático Brasileiro. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO – SIMGEO. 3., Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2010. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/Todos_Artigos/A_17.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2016.

SANTOS, *et al.* Interferometria SAR (Bandas X e P) na Estimativa de Biomassa Florestal. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO – SIMGEO. 1., Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2004. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/>>. Acesso em: 14 dez. 2016.

SANTOS, A.P. **Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais com o Uso de Estatística Espacial**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SANTOS, A.P. et al. Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22(4), pp. 630-650. 2016.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T., Análise Comparativa entre Modelos Digitais de Elevação com Distintas Características de Processamento e Aquisição. **Boletim de Geografia**, v. 33, número especial, p. 106-121, Maringá, 2015.

SOLBERG, S. *et al.* Estimating spruce and pine biomass with interferometric X-band SAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, pp. 2353-2360. DOI: 10.1016/j.rse. 2010.

SOSA, C. D. R.; SUAZA, S. A. O. Modelación Económica con Información Espacialmente Explícita de la Deforestación en Urabá, Colombia, 1980-2000 ESPACIALMENTE. **Semestre Económico** - Universidad de Medellín, Medellín, v. 14, n. 29, p. 31-51, Dezembro 2011. ISSN 0120-6346.

STANAG n° 2215, **Standardization Agreement. Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data**. Nato Standardization Agency – NSA. North Atlantic Treaty Organization (NATO). Bruxelas, 7ª Ed, 2010.

TACHIKAWA, et al. 2011. Characteristics of Aster Gdem Version 2. **IEEE INTERNATIONAL GEOCIENCE AND REMOTO SENSING SYMPOSIUM**. Vancouver, C nada. 2011.

TEMBA, P.C. **Ajustamento Simultâneo do Bloco de Faixas do Laser Scanner Aerotransportado (Als)**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

TIGHE. M. L., CHAMBERLAIN. D. Accuracy Comparison of the SRTM, ASTER, NED, Nextmap  USA Digital Terrain Model Over Several USA Study Sites. **ASPRS/MAPPS, Fall Conference November**. pp 16-19, San Antonia, Texas, 2009.

TIMBÓ ELMIRO, M. A. **Corre o de modelos digitais de eleva o INSAR através de superfícies de ajustes geradas por métodos de interpola o espacial**. 2008. 206 f. (INPE-15382-TDI/1401). Tese (Doutorado em Computa o Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

TIMBÓ ELMIRO, M. A. *et al.* Avalia o de Dados de Altimetria da Floresta Amazônica Baseados nas Tecnologias INSAR, LIDAR e GPS. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, p. 233-246, 2006.

USGS. **Shuttle Radar Topography Mission - Interferometry and SRTM - An Overview**, 2008. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/data/interferometry.php>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

_____. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global**, 2015. Disponível em: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. Acesso em: 02 fev. 2016.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de eleva o com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordena o de Ensino, Documenta o e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p., 2004.

_____. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia, GO. **Anais...**, 2005. p. 1-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2015.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: Sele o de Coeficientes Geoestatísticos para o Refinamento Unificado de Dados SRTM**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordena o de Ensino, Documenta o e Programas Especiais (INPE-16701-RPQ/853). 2010.