

Estudo sobre o emprego de modelos digitais de terreno e elevação, gerados de levantamento topográfico convencional, Perfilamento a Laser Aéreo, SRTM, TOPODATA, ASTER GDEM V2 e WorldDEM, com ênfase em projetos viários

Glauber Carvalho Costa ^{1,2}
Rafael Claudino da Silva ¹
Igor de Carvalho Almeida ¹
Rubens José Souza Galvão ²

¹ Maia Melo Engenharia
Rua General Joaquim Inácio, nº136 – Ilha do Leite, CEP 50070-270 – Recife/PE
rafaelclaudino.eng@gmail.com, igorcarvalho78@hotmail.com

² Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP
Centro de Tecnologia CCT - Departamento de Engenharia Civil
glauber.carvalho@unicap.com, rubensjsg@gmail.com

Abstract. Due to the technological advancements in the area of topographic data acquisition and the consequent reduction of costs in the acquisition of data through orbital remote sensing, the application of these products has been increasing in the most diverse areas of engineering, especially in roadway and railway infrastructure projects. Unlike other countries, where continuous programs of cartographical updates and DSM and DTM acquisition take place aiming to support infrastructure projects, Brasil does not have any governmental initiatives in order to comply with market demands for medium and small scale topographical data. The present research aims to establish an statistical comparison of altimetric data, as well as compare the earthmoving volumes and analyze the morphology of digital terrain models obtained through different data acquisition methods in an specific area of study and geometric project of a prototype railway. The altimetric data were collected through conventional topography, laser scanning and remote sensing (SRTM, TOPODATA, ASTER GDEM V2 e WorldDEM). Thus, a study was done on a 5.1km railway segment leading to the conception of both a horizontal and a vertical alignment, based on the design guidelines recommended by the standards of DNIT, as well as the terrain data framework analysis accordingly to the standards of cartographic accuracy.

Palavras-chave: remote sensing, laser scanning, digital terrain models, Sensoriamento Remoto, MDT, MDE, WorldDEM.

1. Introdução

A demanda por modelos digitais de superfície (MDS) ou Terreno (MDT) tem aumentado significativamente devido aos avanços tecnológicos ocorridos na área de aquisição de dados topográficos, e pela crescente redução nos custos desses produtos, especialmente os obtidos por meio de sensores remotos orbitais. Esses dados do relevo e planimetria do terreno, são usados em aplicações nas mais diversificadas áreas da engenharia, sobretudo em projetos de infraestrutura rodoviária e ferroviária, mas diferentemente de alguns países, onde existe uma programação contínua de atualização cartográfica e de aquisição de dados MDS e MDT, objetivando apoiar sobretudo projetos de infraestruturas, o Brasil não possui iniciativas governamentais capazes de atender as demandas do mercado por dados cartográficos de média e pequena escala.

Atualmente os dados planialtimétricos obtidos com a topografia convencional ainda alcançam melhor desempenho quanto a precisão dos resultados, quando comparado com a

topografia realizada por meio de sensores remotos orbitais ou aerotransportados, mas é viável a aplicação desses dados em determinadas fases de projetos (Costa e Silva, 2008), mais é pela falta de estudos mais aprofundados sobre os produtos gerados pelos novos sensores orbitais disponibilizados no mercado, que os profissionais de engenharia rodoviária ou ferroviária, em muitos casos, não optam por utilizá-los, escolhendo as técnicas consagradas, como a Laser Scanner Aerotransportado ou a topografia convencional.

Entretanto sabe-se que a aplicação das técnicas de levantamento topográfico convencional na fase de estudos preliminares ou de projeto básico, por trata-se de estudos que necessitam de um nível de precisão inferior e uma área abrangência de levantamento mais elevada em relação a adotada na fase de projeto executivo final, passa a ser mais dispendiosa, por necessitar de equipes mais numerosas para atendimento aos prazos, logo demandando maior custo de execução, quando comparada as técnicas de sensoriamento remoto, pois esta última pode ser aplicada nas etapas do projeto onde o grau de precisão exigido não corresponder ao de projeto executivo final, por exemplos em Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) ou projetos básicos de engenharia rodoviária ou ferroviária.

Portanto o objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento altimétrico dos produtos gerados com Laser Scanner Aerotransportado, sensoriamento remoto (SRTM, TOPODATA, ASTER GDEM V2 e WorldDEM) disponíveis no mercado, frente a um MDT gerado a partir de dados topográficos de campo realizados com nível eletrônico, estação total e Sistema de posicionamento por satélite.

Topografia convencional: Para realizar a topografia convencional, foi adotado os Sistema Global de Posicionamento por Satélite (GNSS), para realizar o georrefenciamento do levantamento e permitir a implantação da poligonal fechada em bases diferentes adotada como apoio para o levantamento planialtimétrico. Após implantação da poligonal de apoio, foram realizadas as medições altimétricas dos marcos por meio de estação total.

Perfilamento a Laser: O sistema de varredura laser (laser scanning) aerotransportado é um método para a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos na superfície da terra. Seu funcionamento baseia-se na utilização de um pulso de laser que é disparado na direção da superfície. Ao atingir a superfície, parte do sinal emitido é refletida na direção do sensor. O sensor mede tanto a intensidade do sinal de retorno, como também o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno, que é usado para calcular a distância sensor-objeto, considerando que o pulso laser se propaga à velocidade da luz. No presente estudo foi utilizado um levantamento realizado com laser scanner aerotransportado densidade de 5 pontos tridimensionais para cada metro quadrado no terreno (5 ptos /m²).

SRTM: A missão Topográfica Radar Shuttle ou em inglês SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), consistiu num sistema de radar que voou a bordo do ônibus espacial Endeavour durante os 11 dias da missão STS-99, foi um projeto conjunto entre a National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA) ocorrido em fevereiro de 2000, levantando uma malha tridimensional de pontos com gride de 90m por 90m (3 arco-segundos) para o Brasil. Teve como objetivo, obter modelos digitais de elevação em uma escala quase que global da Terra, produzindo dados topográficos digitais de 80% da superfície terrestre, disponibilizados para a aquisição gratuita a partir de 2001.

TOPODATA: O projeto Topodata do Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza gratuitamente o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas de todo o território nacional, lançado pela primeira vez, em agosto de 2008 e com revisão de novembro de 2011, os dados disponibilizados foram elaborados a partir dos dados

SRTM da USGS (INPE, 2016). A malha tridimensional de pontos disponibilizada tem gride de 30m x 30m, resultante do refinamento dos dados SRTM, por meio do preenchimento de falhas, melhorando assim a resolução original 3 arco-segundos (90m) para 1 arco-segundo (30m), processados por interpolação com algoritmo de krigagem.

ASTER GDEM V2: O Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) é um programa realizado em conjunto entre a National Aeronautics and Space Administration (NASA) e o ministério japonês da economia, indústria e comércio. A primeira versão do ASTER GDEM foi lançada em junho de 2009, e a segunda em outubro de 2011. O ASTER GDEM tem malha tridimensional de pontos disponibilizada com gride de 30m x 30m. Os dados ASTER GDEM são obtidos através de imagens estereográficas e não por radar como o SRTM DEM.

WORLDDDEM: Os dados de malha tridimensional de pontos com gride de 12m por 12m, obtidos pelos radares orbitais TanDEM-X e TerraSAR-X, colocados em órbita pela Agência Espacial Alemã (DLR), e comercializada pela AIRBUS Defence e Space, os dados de elevação do terreno foram gerados por meio de interferogramas, sendo também denominados de Modelos de Terreno.

2. Metodologia de Trabalho

A região de estudo está situada ao sul da cidade de São José do Rio Preto no Estado de São Paulo, localizada no enquadramento geográfico de Latitude (20°54'34"S a 20°56'00"S) e Longitude (49°23'55"O a 49°20'00"O), a área teste estudada, abrange um segmento do projeto ferroviário para o novo traçado da linha férrea existente que corta os municípios de Mirassol, São José do Rio Preto e Cedral, localizadas no estado de São Paulo, tendo esse segmento de estudo uma extensão de 5,10km.

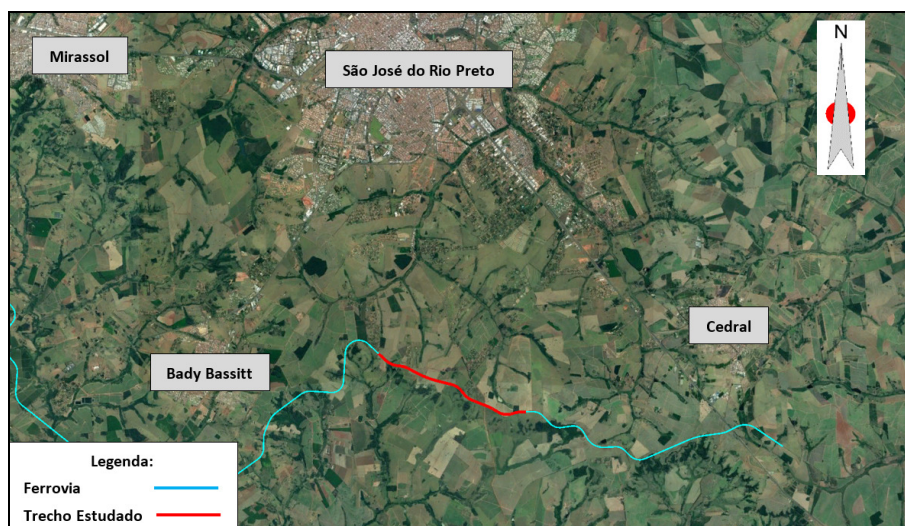


Figura 1 – Área de estudo enquadramento geográfico de Latitude (20°54'34"S a 20°56'00"S) e Longitude (49°23'55"O a 49°20'00"O).

Os dados utilizados foram obtidos a partir de projetos de distribuição gratuita na rede de computadores, e disponibilizados pelos seus desenvolvedores, como o dados da missão Topográfica Radar Shuttle ou em inglês SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) obtidos a partir do programa Brasil em Relevo da EMBRAPA (disponível em <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>); dados da TOPODATA obtidos a partir do programa desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (disponível em

<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>); e dos do programa Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) ou simplesmente ASTER GDEM V2, obtidos a partir do programa de disponibilização gratuito desenvolvido pelo Japan-US ASTER Science Team (disponível em <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>).

Também foram usados dados resultantes do programa desenvolvido pela Agência Espacial Alemã (DLR), e comercializada pela AIRBUS Defence e Space, o WorldDEM e de perfilamento a laser aerotransportado, por fim a topográfica convencional realizada em campo, com emprego de sistema de posicionamento global do tipo GNSS, estação total e nível, adotando como método de levantamento a poligonação.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise estatísticas dos dados e enquadramento na escala cartográfica

Para realizar uma adequada avaliação dos dados altimétricos, foi verificado seu enquadramento através de parâmetros estatísticos e de confiabilidades dos produtos cartográficos, segundo o Decreto nº 89.817, em seu capítulo II, seção 1, Art. 8º, cujo o mesmo estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC utilizado como referência na avaliação dos produtos cartográficos no Brasil, sendo o PEC um indicador estatístico de dispersão relativo a 90% de probabilidade, que define a acurácia (exatidão) dos trabalhos cartográficos. É importante ressaltar que para o presente estudo, não foi realizada a proporção amostral simples como critério de avaliação, para avaliação da qualidade dos dados altimétricos estudados, visando, sobretudo sua classificação cartográfica quanto ao PEC.

Foram utilizados dois métodos para avaliar o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) através da análise da proporção amostral simples, definido pelo Decreto 89.817 de 20 de julho de 1984. O primeiro método é a partir do cálculo do erro médio quadrático (EMQ) e o segundo a partir do cálculo da tolerância vertical, sendo calculada à porcentagem de pontos que satisfazem o PEC ($\geq 90\%$). O EMQ_z corresponde ao Erro-Padrão, e pode ser calculado a partir da Equação 1:

$$EMQ_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{iT} - Z_{iC})^2}{n}} \quad (1)$$

Sendo, n – é o número de pontos da amostra, Z_{iT} – Cota altimétrica obtida em campo, para o ponto i , Z_{iC} – Cota altimétrica do mesmo ponto nos dados dos terrenos estudados.

A equidistância das curvas de nível em cada escala foi definida conforme proposto pelo Decreto nº 89.817. A Tabela 1 apresenta estas equidistâncias, assim como, os valores de referência do PEC e EP para os produtos cartográficos classificados nas classes A, B e C.

Tabela 1. Escalas e respectivas equidistâncias das curvas de nível, valores do PEC e EP.

PEC ^(a)	PEC-PCD	1:1.000 (Eqd = 1 m)		1:2.000 (Eqd = 1 m)		1:5.000 (Eqd = 2 m)		1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10m)		1:50.000 (Eqd = 20m)		1:100.000 (Eqd = 50m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67

Os resultados do EMQ_z dos dados altimétricos dos modelos digitais resultantes do levantamento com Perfilamento a Laser aéreo, SRTM, TOPODATA, Google Earth, ASTER GDEM V2 e WorldDEM 12m, comparados com topografia convencional realizada em campo, apresentou as variações indicadas na tabela 2 apresentada abaixo, e é resultado da análise de 970 pontos levantados em campo. Sabendo que para se enquadrar em cada classe e escala o EMQ deve ser menor que o erro padrão de cada escala/classe.

Já a tolerância vertical (%PEC) é calculada a partir da porcentagem de pontos que apresentem resíduo, isto é, diferença de altitude entre o ponto visitado e o ponto de controle, abaixo da tolerância vertical aceita para cada classe/escala; a porcentagem dos pontos dentro da tolerância vertical deve ser pelo menos de 90%.

Tabela 2 - Dados do Erro Médio Quadrático das diferenças dos valores das cotas interpoladas dos terrenos estudados e das cotas da topografia convencional de campo.

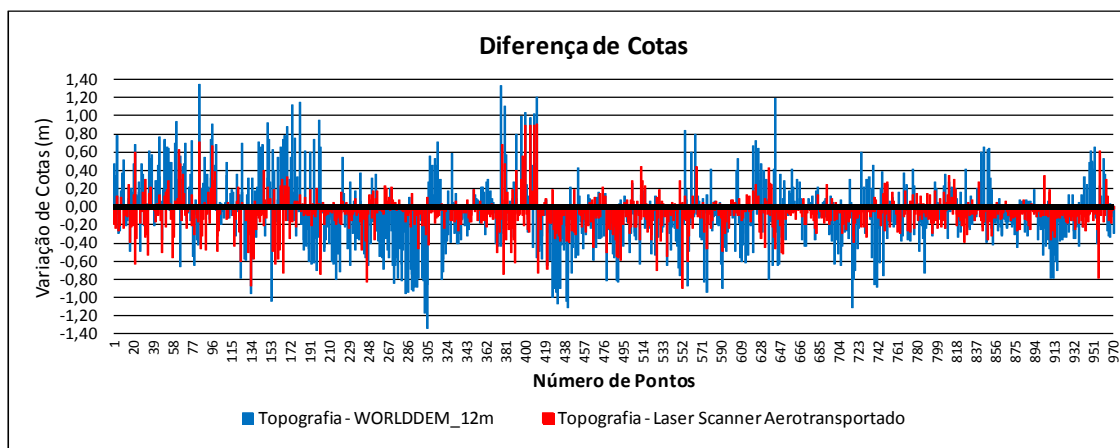
	SRTM 90m (m)	GDEM 30m (m)	TOPODATA 30m (m)	Google Earth (m)	WorldDEM 12m (m)	Perfilamento a Laser (m)
PEC (Altimetria)	10,00	5,00	5,00	5,00	2,50	0,50
%PEC (Calculado)	93,8%	96,6%	95,8%	90,7%	96,7%	92,1%
EP (Altimetria)	6,670	3,330	3,330	3,330	1,670	0,330
EP = EMQ _z	4,934	2,157	2,176	2,780	0,955	0,306
Média	2,911	0,992	0,743	1,488	0,084	-0,061
Desvio Padrão	3,983	1,915	2,045	2,348	0,952	0,299
Escala Cartográfica	1/50.000	1/25.000	1/25.000	1/25.000	1/10.000	1/2.000

Conforme observado na Tabela 2 acima, os valores de discrepâncias calculados a partir dos dados do WorldDEM 12m e Perfilamento a Laser alcançaram resultados mais satisfatórios, escalas cartográficas de 1/10.000 e 1/2.000 Classe A respectivamente, enquanto os demais dados alcançaram resultados satisfatórios (escala cartográfica de 1/25.000 para Classe A) quando comparados com outros estudos (Garofalo e Liesenberg,2015).

3.1.2 Análise estatística dos dados quanto a acurácia

O gráfico apresentado abaixo (Gráfico 1), demonstra as divergências encontradas entre o valor considerado exato da altimetria do terreno (topografia convencional), representada pela linha preta horizontal de ordenada zero, e as discrepâncias altimétricas encontradas entre os dados altimétricos do WorldDEM 12m e do levantamento por Perfilamento a Laser aéreo.

Gráfico 1 - Divergências da altimetria do terreno da topografia convencional e WorldDEM 12m e do levantamento por Perfilamento a Laser aéreo.



3.2. Processamento e análise das imagens hipsométricas

Conforme observa-se nas amostras de imagens hipsométricas (Lat:20°54'45"S e Long:49°23'19"O; Lat: 20°54'54"S e Long: 49°23'01"O) da figura 3, correspondente a uma área de 188,5 ha, a superfície gerada que mais se aproxima da superfície de terreno levantada pela topografia convencional (Figura 3f) é a gerado pelo laser scanner aerotransportado (Figura 3e), devido a qualidade posicional e altimétrica verificadas anteriormente.

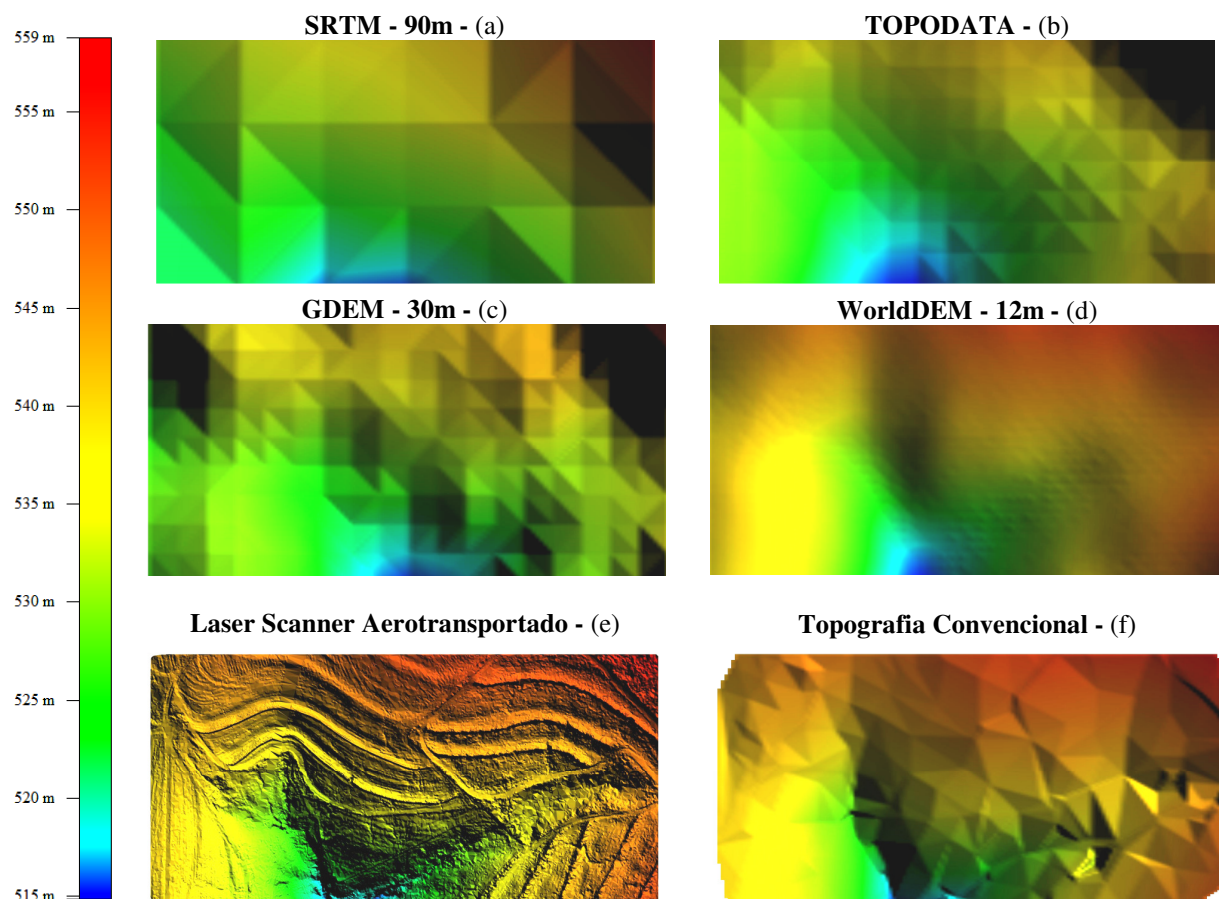


Figura 3 – Imagens hipsométricas de parte do levantamento estudado.

3.3 Processamento e análise dos volumes de terraplenagem

Com base nas superfícies processadas, levantadas por topografia convencional, Laser Scanner Aerotransportado e sistemas remotos orbitais, foi projetado um eixo de projeto e um greide embasado nas especificações de projetos ferroviários, preconizados pelas normas do DNIT, com extensão de 5,10km, sendo o greide concebido de maneira que houvesse curvas verticais com corte e aterros. Os cálculos dos volumes da cubação, foram obtidos segundo o volume dos prismóides resultantes das médias de duas áreas consecutivas de seções multiplicadas pela distância entre elas, ou seja, o produto da soma das áreas de duas seções consecutivas multiplicado pela semi-distância entre elas.

Conforme pode-se observar nas Tabela 3, os resultados dos volumes de Terraplenagem mostram que as diferenças entre o MDT da topografia convencional e os MDT's do WorldDEM 12m e Perfilamento a Laser, mostraram-se dos menos discrepantes, sendo essa diferença podendo ser influenciada pelos seguintes fatores: tanto o método de levantamento por perfilamento a laser Aéreo como o WorldDEM 12m, não são capazes de obter as informações tridimensionais do leito de cursos água, como também foi observado que a

região levantada, apresenta vegetação com pequenos arbustos e árvores de médio porte, esses fatores exigem a intervenção humana no processamento juntamente com análises estatísticas para se obter um MDT mais compatível com o existente no campo.

Em relação aos volumes de corte a aterro, constatou-se que os volumes utilizando o MDT's do WorldDEM 12m e Perfilamento a Laser, apresentaram discrepâncias de Volumes de aterro que variaram entre 13,28% e 16,88%, sendo a diferença mais significativa relativa as comparações feitas entre os volumes de corte, que variaram entre -20,73% e 0,05%, quando comparados aos volumes processados do MDT gerados pela topografia convencional.

Tabela 3 – Comparativo de volumes de terraplenagem do MDT gerados pela topografia convencional e dos demais métodos estudados.

Dados	Volumes de terraplenagem		Diferenças percentuais entre os volumes de terraplanagem gerados a partir dos dados da Topografia Convencional e os demais métodos de levantamento remoto estudados	
	Aterro (m ³)	Corte (m ³)	Aterro (%)	Corte (%)
Topografia Convencional	18.054,00	23.891,10	-	-
SRTM_90m	33.612,80	116.184,30	86,18%	386,31%
ASTER GDEM V2 30m	14.959,40	84.869,80	-17,14%	255,24%
TOPODATA	24.247,00	66.476,90	34,30%	178,25%
Google Earth	8.780,20	80.776,60	-51,37%	238,10%
WorldDEM 12m	20.450,90	18.938,50	13,28%	-20,73%
Perfilamento a Laser	21.101,70	23.901,90	16,88%	0,05%

Quanto aos dados dos volumes processados pelo MDT topografia convencional quando comparados com os demais métodos, provenientes de sistema sensores orbitais, os mesmos apresentaram discrepâncias significativas, sobretudo pelo fato dos mesmo serem modelos digitais de superfícies MDS e não MDT, carregando consigo informações incompatíveis ao MDT. Entretanto pode-se destacar que esse podem ser adotados em estudos de bacias hidrográficas para fins de projeto de drenagem e de macrobacias, como também para estudos de traçado de vias, na fase de estudos preliminar, sobretudo em áreas onde não há cobertura de mapeamento atualizado ou quando a mesma é inexistente.

3.3. Processamento e análise dos perfis longitudinais

Através do eixo de um projeto ferroviária utilizado no presente estudo, também foi elaborado um gráfico comparativo entre os perfis longitudinais resultantes dos dados altimétricos dos modelos digitais estudados (figura 2).

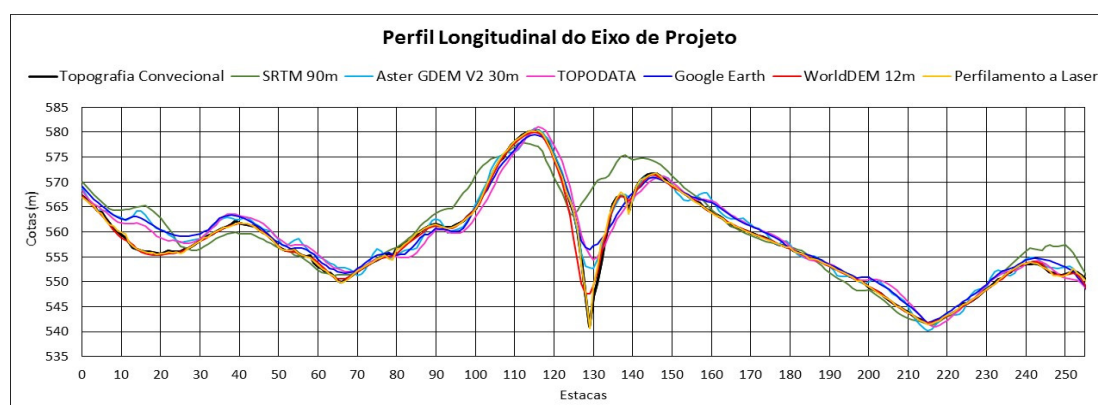


Figura 2 – Perfis Topográficos com os terrenos analisados sobrepostos.

4. Conclusões

Diante dos resultados obtidos com respeito a altimetria dos modelos digitais de terreno (MDT) e de superfície (MDS) analisados em comparação com dados de levantamento topográfico realizado em campo numa mesma área de estudo, pode-se concluir que os dados SRTM apresentaram compatibilidade com a escala 1:50.000 Classe A, já os dados TOPODATA, ASTER GDEM V2 e Google Earth com a escala 1:25.000 Classe A, e por fim os dados do WorldDEM e Perfilamento a laser com escalas de 1/10.000 e 1/2.000 respectivamente. Sendo essas classificações embasadas segundo o que determina o Decreto-Lei nº 89.817/84, no qual baseia-se as especificações do DNIT para classificação de levantamentos aerofotogramétricos com fins de projetos viários.

Apesar do resultado satisfatório altimetria para projeto básico viário (WorldDEM) e projeto executivo viário (Perfilamento a laser), conforme estabelece o manual de diretrizes e bases do DNIT de 2006 nas suas instruções de serviço (IS-227 e IS-226). Entretanto é importante ressaltar a necessidade de se realizar uma atualização e melhoria das normas para mapeamento, pois ainda utilizam parâmetros baseados na cartografia analógica.

Já para os resultados verificados pelos demais terrenos (MDE) analisados (SRTM, TOPODATA, ASTER GDEM e Google Earth), pela ausência de bases cartográficas em algumas regiões do território brasileiro, esses dados mostram-se potencialmente capazes de suprir essa carência de informação altimétrica, principalmente para mapeamento com escalas até 1: 50.000.

Outro teste realizado foi o de volumes de corte e aterro, onde os melhores resultados encontrados de variação de volume de corte foi 0,05% (Perfilamento a laser) e de aterro de 13,28% (WorldDEM), dos quais o volumes de terraplenagem de projetos viários devem ser bem apurados, pois sabendo-se que os custos de terraplenagem em projetos dessa natureza podem representar de 30% a 40% do valor total da obra, onde uma discrepância elevada entre os volumes de terraplenagem, sobretudo o projeto executivo, poderá afetar o custo global da obra.

Agradecimentos

A Empresa Maia Melo Engenharia por disponibilizar os dados utilizados para elaboração do presente estudo.

Referências Bibliográficas

- ASTER, ASTER GDEM. Disponível em: <<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>>. Acesso em: 10.out.2016.
- CONCAR. NORMAS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS, DECRETO Nº 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984. Disponível em <<http://www.concar.ibge.gov.br/detalheDocumentos.aspx?cod=8&In=1>>. Acesso em 13 de outubro de 2016.
- Costa, G.C.; Silva D.C. Classificação de mapeamento aerofotogramétrico com imagens de câmeras digitais não-métricas para fins de projetos de estradas. **Revista da Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésica, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto – SBC**, 2008.
- DSG. EB80-N-72.003: Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais. Brasília: DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO DSG, 2015.
- Garofalo e Liesenberg, Análise comparativa da informação altimétrica presente nos modelos digitais de elevação ASTER GDEM 1 e 2, SRTM e TOPODATA, 2015, Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0565.pdf>>.
- NASA ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>>. Acesso em: 10.out.2016.
- NASA JPL. (2009). ASTER Global Digital Elevation Model. NASA JPL. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/node/1079/>>. Acesso em: 10.out.2016.
- Topodata Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php/>>. Acesso em: 10.out.2016.
- USGS, United States Geological Survey. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso em: 10.out.2016.