

Acurácia posicional de modelos digitais de elevação relativo e absoluto, gerados a partir de imagens ASTER/Terra

Flávio Fortes Camargo
Teresa Gallotti Florenzano
Cláudia Maria de Almeida
Cleber Gonzales de Oliveira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fortes, teresa, almeida, cleber}@dsr.inpe.br

Abstract. Digital Elevation Models (DEMs), relative and absolute, were generated from ASTER/Terra images covering part of the Paraíba do Sul River Valley, located in the São Paulo State, Brazil. The infrared stereoscopic images from the VNIR sensor subsystem were used. The absolute DEM was generated based on ground control points obtained from a cartographic dataset with known accuracy. On its turn, the relative DEM was generated based on the images metadata file complemented by SRTM3 altimetric data. The Toutin 3D physical model was used for the DEMs and orthoimages generation. The planialtimetric validation was executed through graphic analysis, descriptive statistics and hypotheses tests. The precision test reference was the standard deviation established by the Brazilian Cartographic Accuracy Standard (PEC in portuguese). Therefore, the DEMs were classified in accordance with the National Cartography Technical Norms. Concerning the altimetry, the root mean square error of the relative DEM was approximately four times greater than the one of the absolute DEM, and both presented trend. The relative DEM attained altimetry PEC A class at a 1:100,000 scale and the absolute DEM attained altimetry PEC B class at a 1:50,000 scale. The planimetric validation indicates that the data are suitable for thematic mapping (geomorphological mapping, for example) at a 1:50,000 scale.

Palavras-chave: remote sensing, stereoscopy, digital images processing, cartographic accuracy standard, sensoriamento remoto, estereoscopia, processamento digital de imagens, padrão de exatidão cartográfica.

1. Introdução

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são importantes fontes de dados sobre o terreno e suas aplicações abrangem diversas áreas do conhecimento. Variáveis geomorfométricas, por exemplo, são úteis em modelagens hidrológicas, geomorfológicas e de desastres naturais. Por outro lado, MDEs também são fundamentais na correção geométrica de imagens de Sensoriamento Remoto. Dentre os esforços recentes para o inventário topográfico do planeta Terra, o sistema sensor óptico ASTER/Terra merece destaque pela qualidade geométrica dos seus MDEs, por integrar dados altimétricos e multiespectrais e pelo baixo custo de suas imagens. Esse sistema sensor cobre a região espectral do visível ao infravermelho termal através de 14 bandas, distribuídas entre os subsistemas VNIR (*Visible and Near-InfraRed*), SWIR (*Short Wave InfraRed*) e TIR (*Thermal InfraRed*). Os MDEs são obtidos do par estereoscópico de imagens do infravermelho próximo, geradas pelo subsistema VNIR (ABRAMS et al., 1999). Neste trabalho, propõe-se a avaliação da acurácia posicional de dois tipos de MDEs ASTER/Terra: aqueles gerados com pontos de controle no terreno (GCPs – *Ground Control Points*) (denominados de MDEs absolutos) e aqueles gerados sem a utilização desses pontos (denominados de MDEs relativos). As informações empregadas pelos últimos são obtidas por meio do sistema de posicionamento da plataforma (ABRAMS et al., 1999). O conhecimento da acurácia posicional de MDEs relativos é relevante em situações nas quais não seja possível ou viável a aquisição de GCPs.

2. Área de Estudo

A área de estudo se localiza no médio Vale do Rio Paraíba do Sul, no estado de São Paulo (Figura 1). Sua área é de 792,87 km² e apresenta tipos de relevo e coberturas do solo diversificados. Dentre as unidades de relevo, destacam-se serras, morros, colinas e planícies

aluviais. A altimetria da área está compreendida entre 500 e 2.000 m. Os tipos de cobertura e uso da terra predominantes são: mata, capoeira, reflorestamento, pastagens, portos de areia e áreas urbanizadas, cobrindo parte dos municípios de São José dos Campos, Jacareí, Caçapava e Monteiro Lobato.

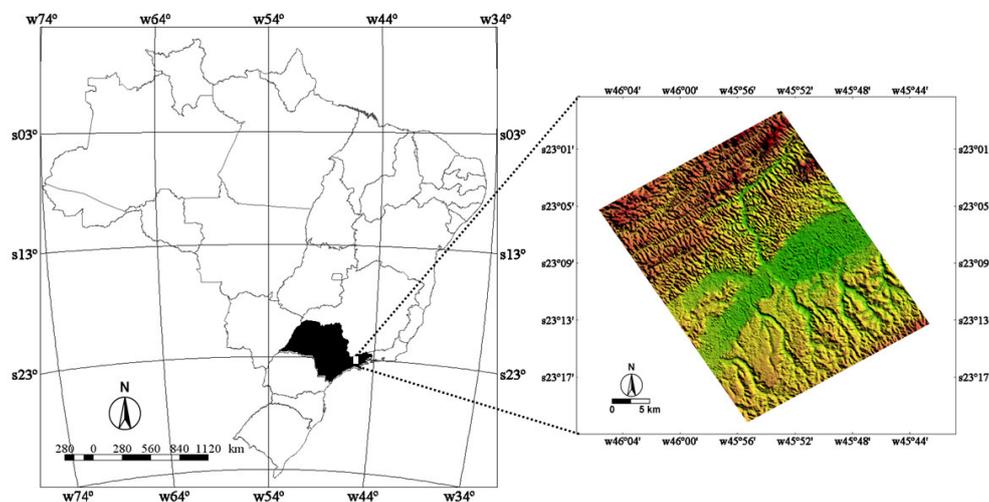


Figura 1 – Localização da área de estudo.

3. Material e Métodos

3.1 Material

Utilizaram-se imagens do sistema sensor ASTER/Terra das bandas 1 (0,52 – 0,60 μm), 2 (0,63 – 0,69 μm), 3N (0,78 – 0,86 μm) e 3B (0,78 – 0,86 μm) no nível de processamento L1B (georreferenciadas e com calibração radiométrica), obtidas em 31/08/2004. As imagens 3N e 3B constituíram o par estereoscópico para a extração dos MDEs. As bandas 1, 2 e 3N foram ortorretificadas e utilizadas na validação da planimetria a partir de feições notáveis identificadas nos dados de referência.

O conjunto de dados de referência se constituiu de 82 pontos GPS de precisão, arquivos vetoriais contendo curvas de nível, pontos cotados e eixos de logradouros, além do MDE SRTM3 correspondente à área de estudo. Os pontos GPS (com altitudes ortométricas), obtidos por meio de receptores geodésicos, foram obtidos a partir dos seguintes órgãos: Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE). Os arquivos vetoriais, por sua vez, foram obtidos da Prefeitura Municipal de São José dos Campos (PMSJC), e o MDE SRTM3 na página da NASA na *internet* (NASA, 2007).

Os pontos GPS foram utilizados na validação da altimetria dos MDEs obtidos dos dados ASTER/Terra. Os arquivos vetoriais foram empregados na coleta de GCPs para a geração do MDE absoluto. Desse modo, para os GCPs, as coordenadas E e N foram extraídas da base de eixo de logradouros, e os valores altimétricos (H) foram extraídos do MDE gerado a partir das curvas de nível e dos arquivos de pontos cotados disponibilizados pela PMSJC. Na validação da planimetria, utilizaram-se pontos independentes (em relação aos GCPs mencionados), também obtidos na base de eixo de logradouros. Devido à inexistência de informações altimétricas no arquivo de metadados das imagens, o valor da elevação do MDE SRTM3 foi combinada aos pontos de controle planimétricos (latitude e longitude) adquiridos pela plataforma, disponíveis no mesmo arquivo de metadados. Esses pontos de controle foram utilizados na geração do MDE relativo. A Figura 2 apresenta a distribuição dos pontos de validação na área de estudo.

Com relação à acurácia posicional dos arquivos vetoriais, a base de eixo de logradouros e o MDE (obtido desses arquivos) se enquadram na classe A, respectivamente, escalas 1:10.000 e 1:50.000 do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (CAMARGO et al., 2007). De acordo com Merchant (1982), dados de referência devem apresentar erro posicional igual ou inferior a um terço do erro padrão da escala avaliada. Desse modo, a base de eixo de logradouros (com erro máximo de 2,1 m) e os pontos GPS foram adotados como dados suficientemente acurados para a validação dos MDEs ASTER/Terra.

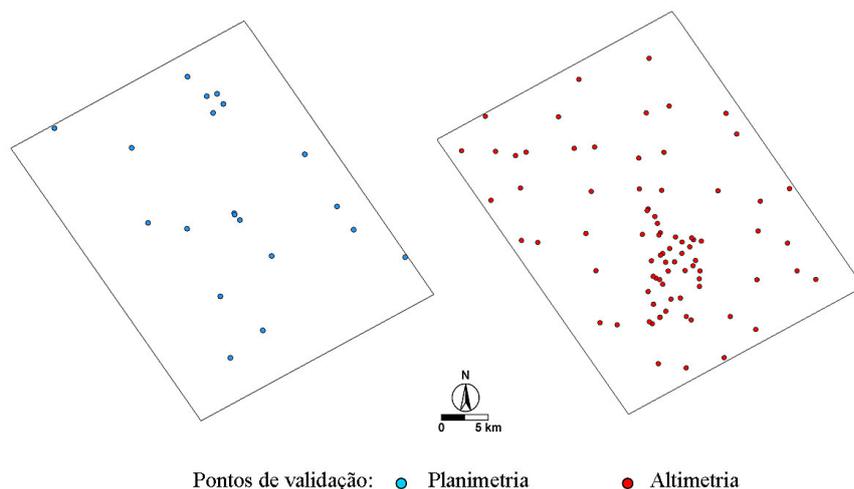


Figura 2 – Distribuição dos pontos de validação da planimetria e da altimetria.

3.2 Métodos

3.2.1 Geração dos MDEs

Para a extração dos MDEs, foi utilizado o aplicativo PCI Geomatica 10.0.3 (módulo OrthoEngine), no qual os seguintes passos de processamento foram realizados: 1) coleta de GCPs e pontos de enlace (*Tie Points* – TPs); 2) cálculo do modelo matemático e ajuste; 3) geração de imagens com geometria epipolar; 4) cálculo das paralaxes por estéreo-correlação; e 5) geração do MDE.

No caso do **MDE absoluto**, nos passos 1 e 2, utilizaram-se os dados de efemérides e atitude do sistema sensor ASTER/Terra, o modelo matemático *Toutin*, 43 GCPs 3D e 90 TPs 2D. Por outro lado, para o **MDE relativo**, os GCPs e TPs foram substituídos por informações do sistema de posicionamento da plataforma (latitude e longitude de 68 pontos disponíveis nos metadados das imagens) e pela altimetria do MDE SRTM3 (H).

O Modelo *Toutin* se baseia nas equações de colinearidade (para imagens individuais) e coplanaridade (para imagens estereoscópicas), oriundas da fotogrametria (TOUTIN, 2004; 2006). Sabendo-se que os parâmetros necessários para as correções individuais (sensor/plataforma; rotação da terra e projeção cartográfica) são correlacionados, o modelo reduz esses parâmetros a um conjunto descorrelacionado, a partir dos quais realiza, simultaneamente, todas as correções mencionadas (TOUTIN, 2004). A acurácia posicional do modelo pode ser melhorada com o uso de GCPs, empregados em um procedimento iterativo de refinamento pelo método dos mínimos quadrados (TOUTIN, 2004; 2006).

Os GCPs empregados no MDE absoluto foram obtidos da base de eixo de logradouros (coordenadas E e N) e de um MDE (H) gerado com os arquivos de curvas de nível e de pontos cotados, mencionados na Seção 3.1. Com relação aos TPs, Toutin (2004; 2006) os define como pontos homólogos, coletados simultaneamente entre as imagens do par estereoscópico, os quais fornecem maior robustez ao modelo.

Após a orientação do par estereoscópico e extração das imagens epipolares, efetuou-se o cálculo automático das paralaxes. Este foi realizado por meio de janelas de busca e correlação que localizam *pixels* homólogos entre as imagens. A medida de correlação empregada pelo algoritmo utilizado no OrthoEngine é o coeficiente normalizado de correlação cruzada (PCI GEOMATICS, 2003).

Para a validação dos MDEs, foram utilizados os 82 pontos GPS e 20 pontos obtidos da base de eixo de logradouros (Figura 2), ambos referenciados ao *datum* horizontal SAD69/Brasil (projeção UTM). O MDE absoluto foi gerado com a mesma referência planimétrica. Com relação ao MDE relativo, todos os dados obtidos (coordenadas dos metadados e do SRTM3) estão referenciados ao *World Geodetic System* 1984 (WGS 84). Esse sistema de referência fornece altitudes elipsoidais que devem ser convertidas para altitudes ortométricas (referenciadas ao geóide). Inicialmente, o MDE foi convertido para o mesmo sistema de referência planimétrica dos pontos GPS. Posteriormente, para a validação, as altitudes do MDE relativo correspondentes aos pontos GPS foram convertidas em altitudes ortométricas por meio do modelo de ondulação geoidal do território brasileiro (IBGE, 2004). Desse modo, foram obtidas as discrepâncias planimétricas (planimetria MDE – planimetria dos pontos da base de eixo de logradouros) e altimétricas (altimetria MDE – altimetria GPS).

3.2.2 Validação da Acurácia Posicional

Para a validação, foram utilizados como referência os critérios estabelecidos pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional: classes de exatidão por escala, Erro Padrão (EP) e Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). O EP consiste no desvio-padrão de referência. O PEC, o qual define a exatidão de produtos cartográficos, corresponde a um indicador estatístico de dispersão a 90% de probabilidade, obtido a partir do EP (BRASIL, 1984).

O método de validação empregado consistiu na análise de exatidão, a qual é composta dos testes de tendência (“*t*” de *Student*) e de precisão (Qui-quadrado) (GALO; CAMARGO, 1994). Ambos se apóiam nos valores de discrepâncias (Δ) entre as coordenadas dos produtos gerados e as coordenadas de referência (base cartográfica e/ou pontos GPS).

Com base na estatística amostral “*t*” e no seu respectivo intervalo de confiança, o teste de tendência permite verificar se a média das discrepâncias é igual a zero ($H_0: \Delta \bar{X} = 0$ ou $H_1: \Delta \bar{X} \neq 0$) e, desse modo, indica a ocorrência ou não de deslocamentos sistemáticos. Por outro lado, apoiado na estatística amostral χ^2 e no seu respectivo intervalo de confiança, o teste de precisão aponta se as variâncias amostral e a obtida a partir do erro padrão são iguais ou não ($H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2$ ou $H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$). Esse teste indica o grau de dispersão dos erros e, por conseguinte, a precisão (GALO; CAMARGO, 1994).

4. Resultados e Discussões

Inicialmente, os MDEs gerados foram avaliados qualitativamente para a verificação de áreas sem dados (problemas na extração das paralaxes). Essas áreas são mostradas na Figura 3. Os círculos tracejados em preto destacam áreas sem dados, e os retângulos pretos (inseridos nos MDEs) delimitam a área de estudo. Os erros mencionados ocorrem, principalmente, em áreas com corpos d’água, nos quais a correlação entre imagens é prejudicada. Com relação ao ajuste dos modelos, a Tabela 1 apresenta a quantidade e o tipo de pontos coletados, bem como os erros médios quadráticos (EMQ) obtidos. O número elevado de pontos de controle do modelo absoluto foi necessário para uma superestimação do ajuste e, desse modo, reduzir o impacto dos erros de entrada (erros da base e de pontaria) (TOUTIN, 2006).

A avaliação quantitativa foi realizada por meio de análise gráfica, estatísticas descritivas e do emprego dos testes de tendência e precisão mencionados anteriormente. Nos perfis apresentados na Figura 4, verificam-se diferenças altimétricas entre os MDEs (relativo e

absoluto), as quais atingem, aproximadamente, 40 m. Um perfil do MDE de referência (obtido dos arquivos vetoriais da PMSJC) também é apresentado. Nos histogramas da Figura 5, a distribuição dos resíduos altimétricos pode ser avaliada. Nos MDEs absoluto e relativo, respectivamente, 60% e 7% dos pontos apresentaram valores positivos de discrepância. Isto é um indicativo da presença de tendência em ambos os modelos.

Na análise dos resíduos planimétricos, utilizaram-se diagramas de dispersão das componentes E e N (Figura 6) e histogramas (Figura 7) com a distribuição dos valores calculados para as resultantes. A predominância de valores positivos na componente N indica que o MDE absoluto apresenta tendência nesta direção. No MDE relativo, a tendência ocorre na componente E. Observa-se, no MDE absoluto, que 60% das observações apresentam erros entre 15 m e 25 m (Figura 7). Por outro lado, no MDE relativo, 75% apresentam erros entre 30 m e 50 m (Figura 7). As estatísticas descritivas e os resultados dos testes de hipóteses são apresentados na Tabela 2. Os valores mínimo, máximo e a média dos dados planimétricos corroboram as tendências (na componente N para o MDE absoluto, e na componente E para o MDE relativo), verificadas nos gráficos da Figura 6. Para a altimetria, verifica-se a predominância de resíduos positivos no MDE absoluto, e de negativos no MDE relativo. Essas tendências também foram constatadas na análise gráfica (Figura 5). O EMQ foi, aproximadamente, quatro vezes maior nos dados altimétricos do MDE relativo, e o dobro na sua resultante planimétrica.

Nos testes “*t*” ($\alpha = 10\%$), somente as componentes E do MDE absoluto e N do MDE relativo não apresentaram tendência. Porém, ao se verificarem as resultantes planimétricas, ambos os MDEs apresentaram tendência. Esses resultados confirmam a análise gráfica (Figuras 6 e 7). Na análise de precisão ($\alpha = 10\%$) e classificação de acordo com o PEC, a componente altimétrica do MDE relativo atingiu classe A para a escala 1:100.000. Com relação à resultante planimétrica, o mesmo atingiu classe B em escala 1:25.000. Considerando a componente altimétrica do MDE absoluto, esta foi classificada como B na escala 1:50.000. Por outro lado, a resultante planimétrica do MDE absoluto foi aceita na classe A para a escala 1:25.000. Os resultados observados indicam que, para mapeamentos topográficos, os dados ASTER/Terra atendem, no máximo, ao PEC classe B para a escala 1:50.000 (MDE absoluto). Por outro lado, os resultados da planimetria indicam a possibilidade de geração de mapas temáticos (que não exijam precisão altimétrica) em escalas menores a 1:25.000. Neste caso (inventários temáticos), a acuidade na identificação de feições é limitada pela resolução espacial (média) do sistema sensor ASTER/Terra (15 m).

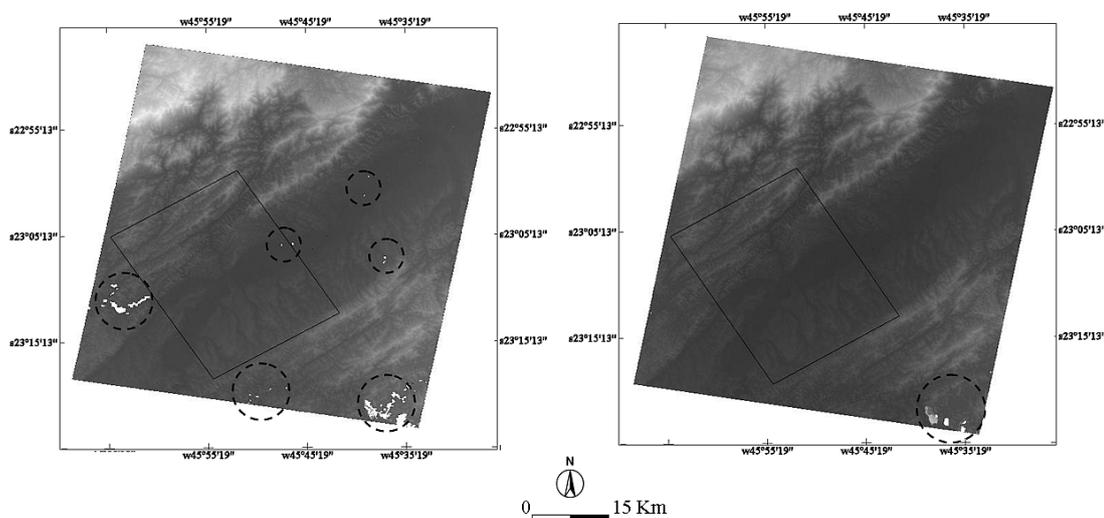


Figura 3 – MDEs absoluto (esquerda) e relativo (direita) e áreas sem dados (círculos tracejados em preto).

Tabela 1 – Resumo das características dos modelos ajustados.

	Nº de pontos de controle	Nº de pontos de enlace	EMQ dos pontos de controle (m)
MDE absoluto	43	90	2,68
MDE relativo	68*	00	1,66

* obtidos no arquivo de metadados das imagens.

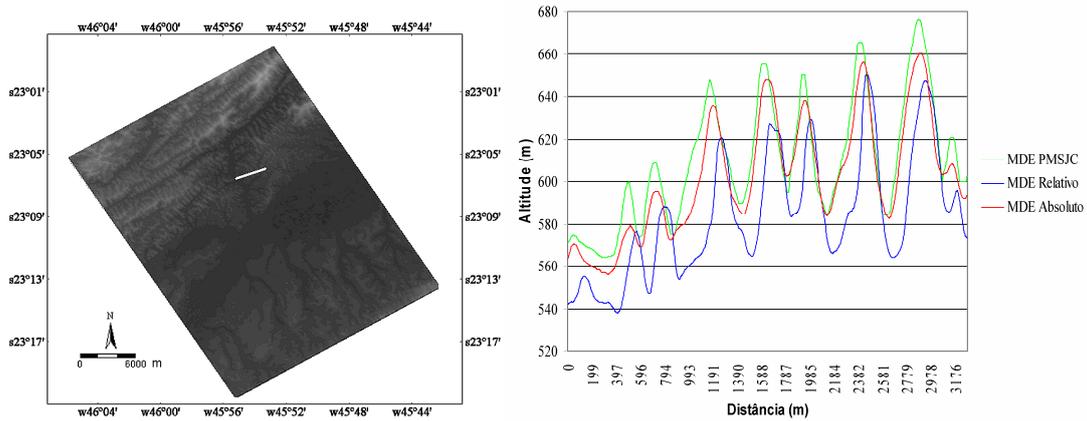


Figura 4 –Localização do transecto utilizado (linha branca, à esquerda) e perfis altimétricos dos MDEs (absoluto, relativo e PMSJC) (à direita).

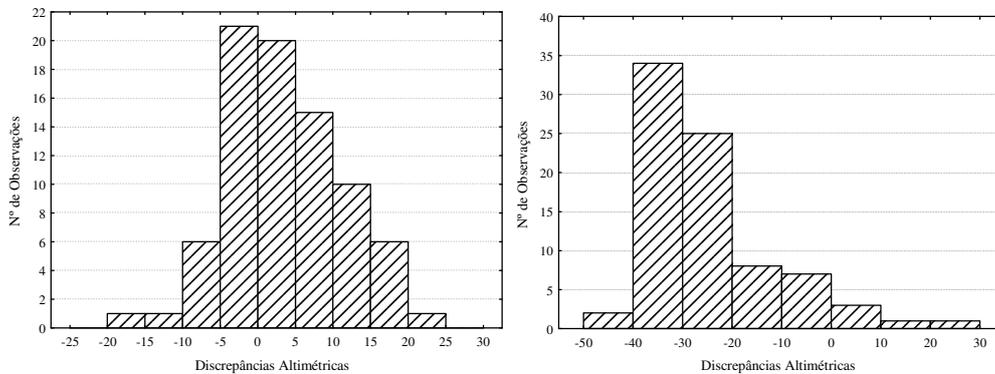


Figura 5 – Distribuição das discrepâncias altimétricas para os MDEs absoluto (esquerda) e relativo (direita).

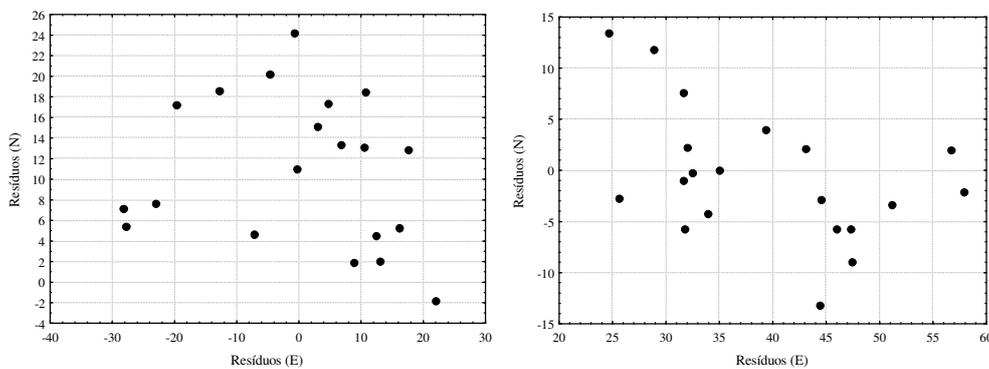


Figura 6 – Gráficos de dispersão dos resíduos das componentes E e N para os MDEs absoluto (esquerda) e relativo (direita).

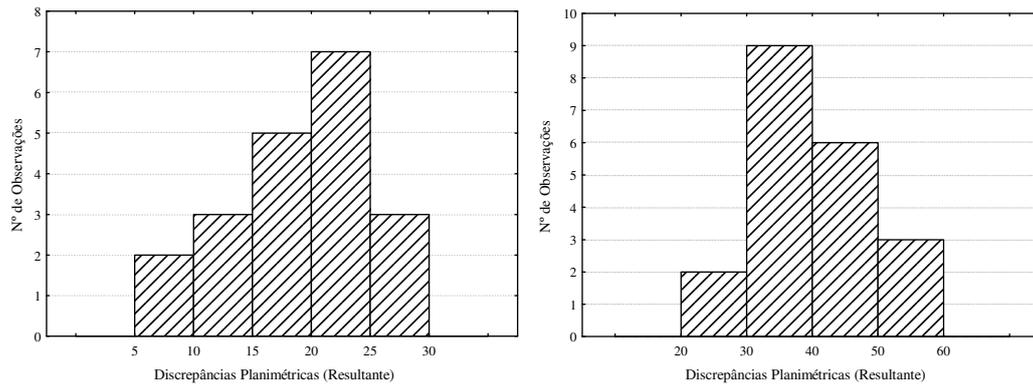


Figura 7 – Distribuição das discrepâncias planimétricas resultantes das componentes E e N para os MDEs absoluto (esquerda) e relativo (direita).

Tabela 2 – Resumo das estatísticas de validação dos MDEs absoluto e relativo.

	MDE absoluto				MDE relativo			
	E	N	Resultante	H	E	N	Resultante	H
Nº de amostras	20	20	20	82	20	20	20	82
$\Delta_{\text{mínimo}}$ (m)	-28,116	-1,88	8,325	-18,388	24,661	-13,19	25,799	-42,579
$\Delta_{\text{máximo}}$ (m)	22,035	24,17	29,007	24,067	57,905	13,41	57,945	20,287
$\bar{\Delta}$ (m)	0,18	10,86	18,86	3,40	39,31	-0,71	39,89	-25,00
S_{Δ} (m)	15,35	7,19	6,08	7,75	9,91	6,50	9,62	12,79
EMQ (m)	15,35	13,26	20,29	8,47	41,53	6,54	42,04	28,22
t_{amostral}	0,054	6,758	13,872	3,950	17,733	0,488	18,551	17,584
$t(n-1,5\%)$	1,729	1,729	1,729	1,664	1,729	1,729	1,729	1,664
χ^2_{classeA} (1:100.000)	9,953	2,181	1,562	17,280	4,150	1,781	3,905	47,136
χ^2_{classeA} (1:50.000)	39,813	8,723	6,247	108,001	16,600	7,126	15,621	294,600
χ^2_{classeB} (1:50.000)	14,333	3,140	2,249	75,001	5,976	2,565	5,623	204,583
χ^2_{classeA} (1:25.000)	159,254	34,894	24,987	432,004	66,400	28,503	62,483	1178,399
χ^2_{classeB} (1:25.000)	57,331	12,562	8,995	300,003	23,904	10,261	22,494	818,333
$\chi^2_{(n-1,10\%)}$	27,204	27,204	27,204	96,578	27,204	27,204	27,204	96,578

5. Conclusões

No caso do MDE absoluto, os resíduos do modelo Toutin, obtidos a partir do ajuste pelo método dos mínimos quadrados, foram semelhantes à acurácia da base de eixo de logradouros (+/- 2m), e, desse modo, os erros de ajuste e a validação do modelo representaram um indicador *a priori* da qualidade do produto a ser gerado.

Os resultados fornecidos pelo MDE relativo destacam a qualidade posicional do sistema sensor ASTER/Terra. Observou-se que os dados de efemérides e atitude combinados com dados altimétricos de outras fontes (no caso da utilização do módulo OrthoEngine) são adequados para trabalhos que não exijam precisão altimétrica superior à do PEC classe A,

escala 1:100.000. No caso do MDE absoluto, a utilização de pontos de controle no terreno aumentou a acurácia altimétrica, e este atingiu PEC classe B para a escala 1:50.000.

As estatísticas de validação referentes à resultante planimétrica e obtidas das ortoimagens, classificam o MDE relativo como PEC classe B, e o MDE absoluto como PEC classe A, ambos para a escala 1:25.000. Porém, a definição de objetos na imagem e a precisão de traço (restituição e/ou segmentação) são limitadas pela resolução espacial (média) do sistema sensor ASTER/Terra (15 m). Assim, mesmo em mapeamentos temáticos (que não exijam precisão altimétrica), é recomendável a apresentação dos dados em escalas menores (1:50.000, por exemplo).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP) pela cessão das imagens ASTER/Terra utilizadas neste trabalho.

Referências Bibliográficas

Abrams, M.; Hook, S.; Ramachandran, B. **ASTER User Handbook (Version 2)**. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory – EROS Data Center, 1999. Disponível em:

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf>. Acesso em: 01.Dez.2007.

Brasil. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 22 de junho de 1984.

Camargo, F. F.; Oliveira, C. G. de; Florenzano, T. G.; Almeida, C. M. de. Avaliação da acurácia posicional da base cartográfica do município de São José dos Campos (SP) por análises de tendência e precisão. In: XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia - I Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, 2007, Rio de Janeiro/RJ. **Anais...**Rio de Janeiro/RJ: SBC, 2007. Artigos, p. 775 – 780.

Galo, M.; Camargo, P. de O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC, 1, v. II, 1994, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC: UFSC, 1994. Artigos, p. 41-48.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **MAPGEO: Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal**. Versão 2.0, Brasil: IBGE, 2004.

Merchant, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: Technical papers of the 42nd american congress on surveying and mapping, 42, 1982, Denver/CO, USA. **Proceedings...** p. 222 - 231.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 06.Dez.2007.

PCI Geomatics. **Geomatica OrthoEngine user guide**. Geomatica Version 9.0, Ontário, Canada: Richmond Hill, 2003.

Toutin, T. Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893 – 1924, 2004.

Toutin, T. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 60, p. 170–181, 2006.