

## Avaliação altimétrica de modelos digitais de elevação extraídos de imagens ASTER em áreas com configuração topográfica distinta

Marcus Andre Fuckner<sup>1,2</sup>  
Teresa Gallotti Florenzano<sup>2</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM/Centro Regional de Belém  
Avenida Júlio César, 7060 – Val-de-Cans – 66617-420 – Belém – PA, Brasil  
{marcus.fuckner@sipam.gov.br}

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Avenida dos Astronautas, 1758 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil  
{marcus, teresa, bete}@dsr.inpe.br

**Abstract.** Digital Elevation Models (DEM) are generated from remote sensing images and may be applied to different studies. This study, using ASTER sensor images as input, aimed at: 1) testing a DEM extraction model to study areas with distinct topographic setting; 2) develop and analyze topographic maps of areas of interest: Sao Paulo (SP) and Rio de Janeiro (RJ), and 3) evaluate the altimetry using quoted points extracted from topographic maps on the 1:50,000 scale through random sampling stratified by altitude classes. DEMs were obtained from the original data of the 3N and 3B bands of the sensor with resolution of 15 meters applying the *AsterDTM* algorithm to three images, which characterized the main features of local relief. The DEM were correlated ( $r = 0.98$ ) to the official topographical mapping data. However, it was necessary to adjust the results, given the values were approximately 20 m lower than the reference. The integrated processing of SRTM and ASTER data in *AsterDTM* proved to be an alternative for the adequacy of the results. It is recommended for further studies using *AsterDTM* or another module for processing, that the ASTER DEMs are evaluated for altimetry through statistical analysis or with the integration of data from other sources, such as the SRTM, and/or field control points, which may be useful for planimetric assessment.

**Palavras-chave:** ASTER, *AsterDTM*, SRTM, topography, São Paulo, Rio de Janeiro, ASTER, *AsterDTM*, SRTM, topografia, São Paulo, Rio de Janeiro.

### 1. Introdução

O sensoriamento remoto é indispensável aos estudos envolvendo topografia, desde o trabalho de restituição fotogramétrica com vistas ao mapeamento altimétrico em diferentes escalas, apoiado nos princípios da estereoscopia, até a obtenção de modelos digitais de elevação. Um modelo digital de elevação (MDE) é representado por uma matriz numérica cujos valores correspondem à elevação da área (Z), referenciada a um sistema de coordenadas espaciais (X e Y), ou por uma representação vetorial.

Com o advento de sensores orbitais, modelos de elevação puderam ser extraídos através da interferometria, modo de operação de alguns sensores imageadores de microondas, como o exemplo do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), ou da estereoscopia, através de sensores ópticos que adquirem imagens com retrovisada, a exemplo do ASTER/Terra.

O subsistema VNIR do ASTER possui resolução espacial de 15 m e recobre a faixa do visível e infravermelho próximo com três bandas. Esse sistema possui ainda uma banda 3B (de “backward”) com o mesmo intervalo espectral (de 0,78 a 0,86  $\mu\text{m}$ ) da banda 3N (de “nadir”), na qual os dados são adquiridos com um ângulo de retrovisada de aproximadamente 28°, permitindo a construção de pares estereoscópicos para cada imagem e a geração de modelos de elevação (ABRAMS et al., 1999). Na opinião de Melgaço et al. (2005) a grande vantagem da retrovisada é que, devido ao curtíssimo intervalo de tempo entre a aquisição das duas imagens que compõem o par, praticamente não há diferenças radiométricas, condições de iluminação da cena e cobertura de nuvens, o que não é verificado em sistemas que adquirem pares estereoscópicos a partir de dados adquiridos em órbitas adjacentes.

Entre os trabalhos experimentais já publicados que empregaram dados ASTER para a obtenção de modelos digitais de elevação, ou seja, não utilizaram o produto nível 3 do ASTER, pode ser citado o de Parma (2007), que teve como objetivo analisar a aplicabilidade do modelo para Cartografia, o de Godoy e Diáz (2007), para o estudo da Geomorfologia, o de Melgaço et al. (2005), que comparou modelos extraídos a partir de dados ASTER e SRTM, e o de Oliveira (2005). Este último autor comparou a adequação dos MDEs gerados a partir de imagens ASTER, RADARSAT-1 e SRTM aos padrões de exatidão cartográfica estabelecidos pela legislação nacional. Seus resultados apontaram para a adequação dos MDEs ASTER à exatidão recomendada para a escala 1:100.000. Como o objetivo deste trabalho foi gerar e avaliar a altimetria de modelos digitais de elevação extraídos de imagens ASTER em áreas com configuração topográfica distinta, foram selecionados os núcleos urbanos de São Paulo e Rio de Janeiro como áreas de estudo, por atenderem a essa característica.

## 2. Material e Métodos

Para o processamento dos dados ASTER adquiridos nas bandas espectrais 3N e 3B foram utilizados os programas: *ENVI 4.2* com o módulo *AsterDTM*, *STATISTICA 6.0* para a análise estatística e *ArcGIS 9.1* para a elaboração de mapas.

O algoritmo *AsterDTM* foi desenvolvido para a geração de MDE a partir de dados ASTER em linguagem *Interactive Data Language (IDL)* com interface gráfica implementada no programa *Environment for Visualizing Images (ENVI)*. Conforme Melgaço et al. (2005), no ambiente do *AsterDTM* a correção geométrica entre as imagens 3B e 3N é feita através dos dados de efemérides do satélite, contidos no arquivo “.hdf” da imagem ASTER. Os modelos digitais de elevação no *AsterDTM* são gerados a partir das imagens brutas disponibilizadas nos níveis de processamento 1A ou 1B, e podem ser extraídos com resolução de saída de 15, 30 ou 60 m. O *AsterDTM* permite a extração dos MDEs utilizando exclusivamente a imagem ASTER, ou ainda integrando-a a outro MDE. Informações com detalhe sobre as opções implementadas no algoritmo podem ser consultadas em Sulsoft (2005). Os procedimentos empregados para a geração e avaliação dos modelos encontram-se sintetizados na Figura 1.

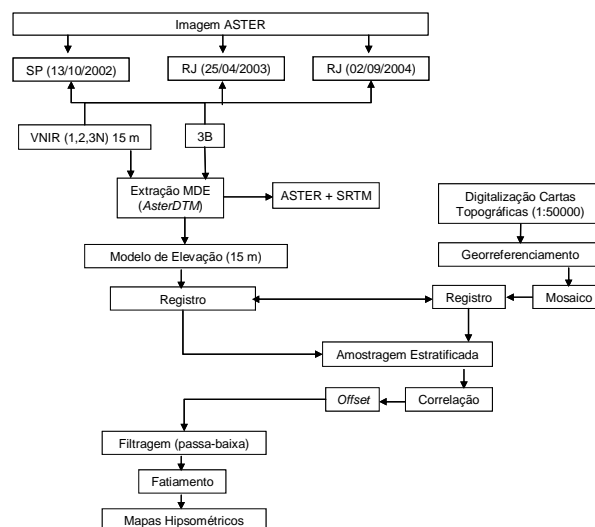


Figura 1. Fluxograma metodológico.

Utilizando o recurso de detecção de corpos de água disponibilizado pelo módulo, foram gerados três modelos para as imagens ASTER. A resolução de saída ajustada foi 15 m. Optou-se por não utilizar informações agregando MDE externo ao processamento tendo em vista os dados disponíveis serem imagens SRTM “.hgt” com 90 m de resolução espacial e GTOPO “.DEM” com 1.000 m de resolução espacial. Após serem gerados, os MDEs foram

registrados com base no mosaico *GeoCover*, cena S-23-20\_2000. O método de interpolação usado foi o vizinho mais próximo, com o emprego de um polinômio de 1º grau. O erro médio quadrático do registro (RMSE) foi de aproximadamente 4 m para os três MDEs obtidos.

### 3. Resultados e Discussão

Os MDEs obtidos apresentaram um ruído considerável, conseqüência, dentre outros fatores, da adoção da resolução espacial máxima permitida para a saída dos modelos no *AsterDTM*, igual a 15 m. Para a visualização dos mapas hipsométricos finais aplicou-se uma filtragem passa-baixa no MDE, utilizando uma janela de 9x9 pixels. Em seguida foram elaborados mapas hipsométricos, classificando os MDEs por faixas de altitude (Figuras 2 e 4).

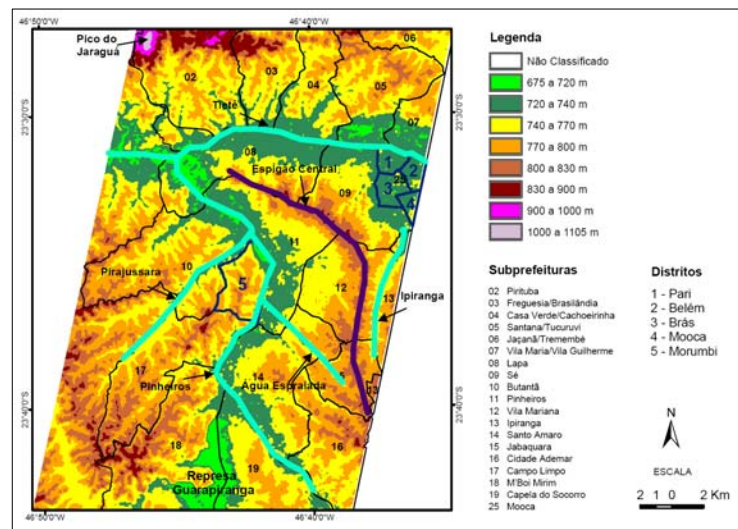


Figura 2. Mapa hipsométrico da área de estudo em São Paulo.

No mapa hipsométrico da área de estudo de São Paulo (Figura 2) podem ser observados os vales dos Rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí, bem como córregos de menor representatividade em suas planícies de inundação, caso do Riacho Ipiranga, Córrego Pirajussara e Água Espraiada, por exemplo, em boa parte canalizados. Um importante componente do sítio urbano de São Paulo é o divisor de águas entre o Rio Pinheiros e o Tamanduateí, conhecido por Espigão Central. A altitude nesta área é superior a 800 m e a orientação do divisor, do distrito de Jabaquara até o de Vila Mariana, é norte-sul e, de Vila Mariana até a Lapa, é sudeste-noroeste. A vertente voltada para o Rio Tamanduateí tem uma declividade menor que a vertente voltada para o Rio Pinheiros (mais abrupta no lado oeste). As áreas a oeste do Rio Pinheiros são predominantemente marcadas por colinas e em alguns trechos por platôs acima de 800 m, onde se localiza o distrito do Morumbi, por exemplo. A área a leste do Tamanduateí, onde estão os distritos da Moóca, Brás e Belém, é predominantemente marcada por terraços planos a sub-planos e por colinas amplas. Estas feições são perceptíveis na Figura 2 e destacadas sobre a Figura 3.



Figura 3. Perfil topográfico A-B representativo da área de estudo de São Paulo.

O MDE do Rio de Janeiro foi classificado em faixas de altitude, considerando a elevada amplitude topográfica verificada (Figura 4). As maiores altitudes obtidas correspondem aos picos dos maciços da Tijuca e Pedra Branca, as maiores elevações dessa área de estudo. Outras feições características do relevo são as elevações de menor proeminência, tais como as serras do Juramento–Misericórdia, do Engenho Novo e de Copacabana–Botafogo. Algumas encostas do Maciço da Tijuca encontram-se ocupadas por favelas, tais como a da Rocinha, Dona Marta e Vidigal. Há também um grande número de favelas em áreas de baixadas como, por exemplo, a Cidade de Deus, o Complexo da Maré, o Jacarezinho e Vigário Geral.

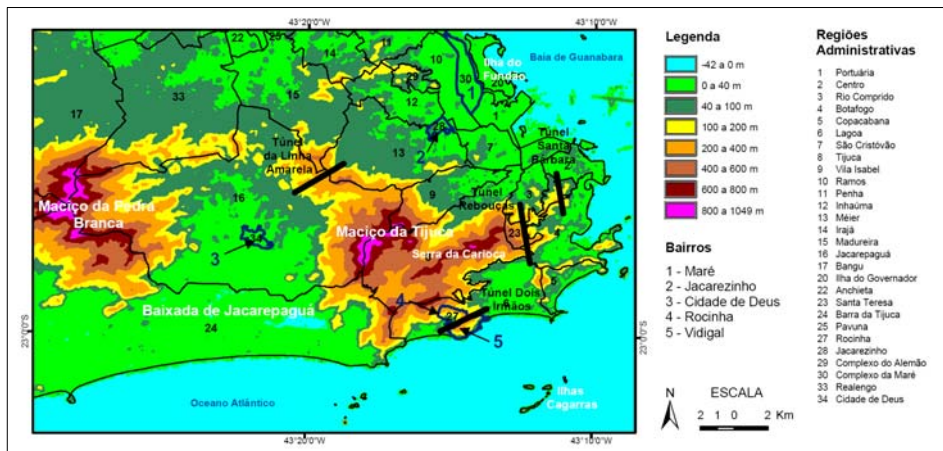


Figura 4. Mapa hipsométrico da área de estudo no Rio de Janeiro.

A Figura 5 apresenta a visualização tridimensional do MDE gerado para a imagem do Rio de Janeiro de 02/09/2004. Segundo dados da Prefeitura Municipal, 22,5% da área do município do Rio de Janeiro encontra-se situada acima da cota 100 m de altitude (RIO DE JANEIRO, 2006). Embora o MDE não contemple todo o município, foi observado que este percentual se assemelha para a área de estudo, pois 22,3% encontra-se acima da cota 100 m.

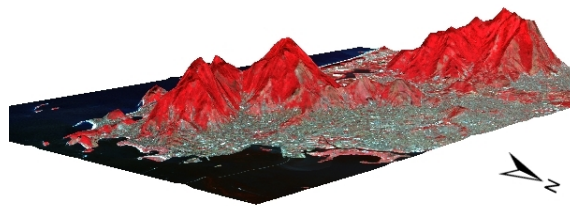


Figura 5. Representação tridimensional do MDE do Rio de Janeiro gerado a partir da imagem de 2004.

O Maciço da Tijuca divide a cidade em zona norte e zona sul. Ele é subdividido pelo Alto da Boa Vista em: Maciço da Tijuca propriamente dito e Serra da Carioca, a leste. As áreas mais planas podem ser subdivididas nas Baixadas Fluminense e de Jacarepaguá. No perfil topográfico extraído do MDE podem ser observadas feições de destaque do relevo (Figura 6).



Figura 6. Perfil topográfico A-B representativo da área de estudo do Rio de Janeiro.

Apesar dos obstáculos do relevo à ocupação humana, algumas vias de interligação das baixadas foram implementadas, tais como a estrada Jacarepaguá – Grajaú e a estrada do Alto da Boa Vista, ambas com alta sinuosidade em seu traçado. O crescimento da cidade e a necessidade de maior acessibilidade conduziram à perfuração dos maciços visando a construção de túneis. Entre estes podem ser citados os túneis Rebouças (Rio Comprido – Lagoa), Dois Irmãos (Gávea – São Conrado), Santa Bárbara (Laranjeiras – Catumbi) e o da Linha Amarela (Água Santa – Freguesia de Jacarepaguá). Outras feições de destaque são as lagoas de Jacarepaguá, Tijuca, Marapendi, Camorim e Rodrigo de Freitas, localizadas entre os maciços e o Oceano Atlântico e separadas deste último por cordões arenosos praticamente ocupados em toda a sua extensão pelo uso urbano.

#### 4. Avaliação dos Modelos de Elevação

Segundo Abrams et al. (1999) os MDEs relativos (elaborados sem pontos de controle) do ASTER podem ser gerados com RMSE de até 10 m. A precisão altimétrica do MDE gerado a partir do *AsterDTM* não é citada em seu manual (SULSOFT, 2005), embora seja difundido o valor de 14 m, podendo divergir conforme a área de estudo. Considerando a configuração topográfica notadamente distinta das áreas de estudo deste trabalho, foi executada uma avaliação dos MDEs para verificar sua conformidade com o mapeamento topográfico oficial.

Inicialmente foi planejado utilizar como referência os marcos geodésicos do IBGE de Referência de Nível (RN). Os memoriais descritivos dessas marcações foram obtidos junto ao IBGE. Entretanto, após verificação dos dados, foi observado que, no caso específico do Rio de Janeiro, quase a totalidade dos dados estão cotados em níveis muito próximos ao do mar. O propósito deste trabalho era o de obter dados amostrados em diferentes faixas de altitude, considerando sua amplitude e a representatividade de cada faixa em área.

Como alternativa, embora de menor precisão planimétrica e altimétrica, foram utilizados como referência dados (pontos cotados) extraídos de cartas topográficas em escala 1:50.000 da área de abrangência das imagens. As cartas Folhas Osasco (IBGE, 1984a), São Paulo (IBGE, 1984b), Vila Militar (DSG, 1963) e Baía da Guanabara (DSG, 1965), foram digitalizadas em cores. Após digitalização, as cartas foram georreferenciadas, mosaicadas e co-registradas com os MDEs. Para o georreferenciamento foram utilizados cerca de 35 pontos para cada carta, e o RMSE foi inferior a 5 m em todos os casos (aproximadamente 0,98 pixel).

A partir de amostragem aleatória estratificada, considerando classes pré-determinadas para a elaboração dos mapas hipsométricos, foram selecionados 75 pontos cotados nas cartas para verificação dos valores correspondentes nos MDEs (Figura 7). Isto para avaliar, por análise de regressão linear simples, a altimetria dos modelos gerados. Estes 75 pontos representaram quase a totalidade de pontos cotados do mosaico de cartas. No caso do Rio de Janeiro, foram selecionados os mesmos pontos de referência para a avaliação dos dois MDEs, permitindo a comparação dos resultados. Para a análise da relação estatística entre as variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ) (Neter et al., 1996).

Para esta etapa da pesquisa foi empregado um modelo de regressão linear simples visando ajustar os valores de altitude obtidos pelos MDEs a uma referência conhecida. O índice de correlação obtido entre o MDE e a Carta foi de 0,9841 para São Paulo, 0,9780 para a imagem de 2003 do Rio de Janeiro e 0,9781 para a imagem de 2004. Era esperado que valores mais altos fossem obtidos para São Paulo, devido à menor amplitude topográfica da área de estudo.

Apesar dos elevados índices de correlação, para todos os MDEs foi necessária a aplicação de um *offset*, pois os valores resultantes foram em média 20 m inferiores aos pontos cotados (Figuras 7 e 8). Isto diverge dos resultados verificados na avaliação de dados SRTM, como a exemplo dos trabalhos de Barros e Cruz (2007) e Zaloti Júnior et al. (2007), que encontraram valores superestimados para os MDEs em relação aos dados de referência. Na Figura 8 pode ser observada a diferença entre as altitudes cotadas nas cartas e as estimadas pelos MDEs.

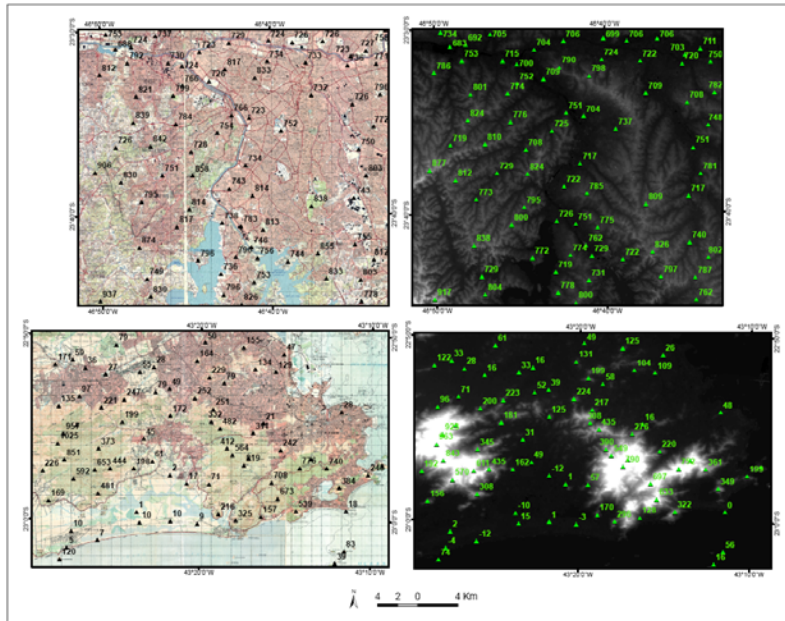


Figura 7. Localização das amostras selecionadas e respectivos valores de altitude (em m) no mosaico de cartas topográficas e nos MDE (o MDE do Rio de Janeiro é de 02/09/2004).

No caso de dados de radar, a superestimação ocorre, em áreas específicas, principalmente pela influência de edifícios ou do estrato arbóreo superior em áreas cobertas por densa vegetação e, para dados adquiridos em bandas de menor comprimento de onda, como as bandas K e X, porque o sinal do radar não é capaz de atravessar estes alvos e obter informações do relevo. Barros e Cruz (2007) verificaram também que as maiores diferenças de altitude são encontradas em áreas de maior declividade, embora tenham considerado sua amostra pouco significativa.

A aplicação do *offset* nos MDEs foi efetuada a partir das equações obtidas nos modelos de regressão linear simples:

- a)  $MDE = -13,834 + 1,0458 * Carta$  (imagem de São Paulo);
- b)  $MDE = 31,533 + 1,0581 * Carta$  (imagem de 25/04/2003 do Rio de Janeiro);
- c)  $MDE = 24,528 + 1,0571 * Carta$  (imagem de 02/09/2004 do Rio de Janeiro).

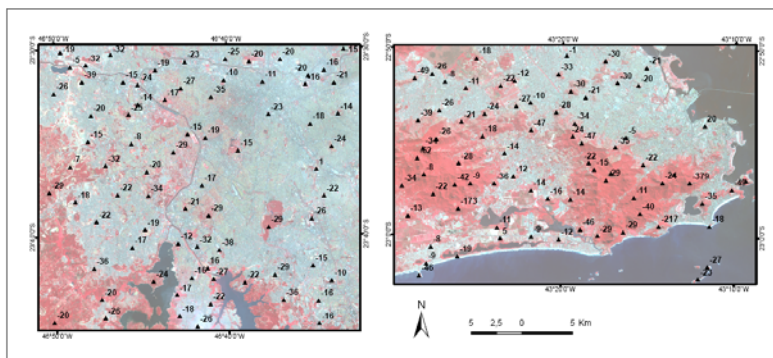


Figura 8. Altitudes cotadas nas cartas topográficas subtraídas das altitudes estimadas pelos MDEs.

A avaliação dos resultados foi fundamental para a correção dos MDEs. Para a área de estudo do Rio de Janeiro, por exemplo, no modelo original as altitudes das áreas emersas mais baixas apresentaram valores inferiores aos do nível do mar. Embora a análise da adequação dos MDEs ao mapeamento topográfico oficial tenha contribuído para o ajuste de seus valores, novos testes podem ser aplicados na comparação entre MDEs obtidos através do módulo

*AsterDTM* utilizando unicamente dados ASTER, ou agregando ao processamento imagens SRTM, na opção disponível de inclusão de MDE externo. Nesta etapa, visando verificar a influência e a diferença entre os resultados, também foram gerados os MDEs utilizando como recurso externo o MDE do SRTM. As imagens SRTM utilizadas (em formato “.hgt”) foram a S23W044 e S24W044 para o Rio de Janeiro e a S24W047 para São Paulo.

A análise dos resultados em faixas de altitude (Figura 9) mostrou que para o Rio de Janeiro e para São Paulo parece ser grande a diferença entre o MDE gerado unicamente a partir de dados ASTER (sem a aplicação das equações de regressão) e o MDE gerado a partir da integração entre dados ASTER e SRTM. Com relação à média das imagens, as imagens ASTER (Tabela 1) apresentaram, médias inferiores, da ordem de aproximadamente 20 m, em relação às registradas com os dados ASTER integrados ao SRTM.

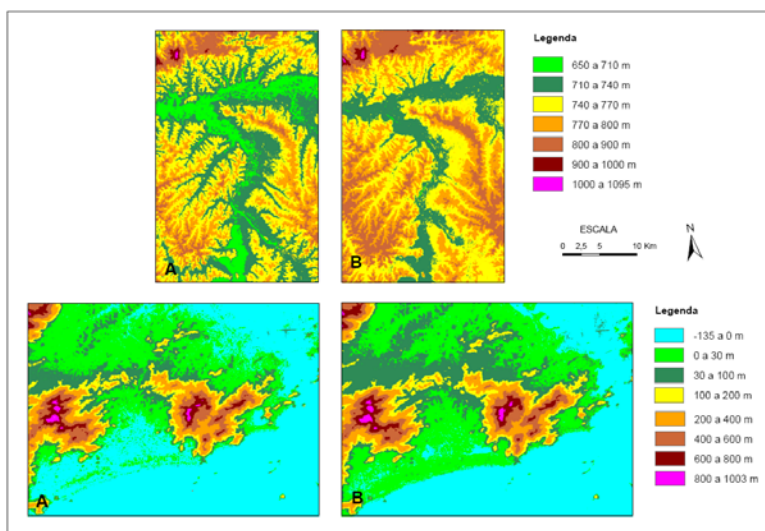


Figura 9. Fatiamento dos MDE brutos ASTER e da integração de dados ASTER e SRTM.

Portanto, neste estudo foi observado que a integração de dados SRTM apresenta potencial para a melhoria dos resultados com o processamento de MDEs no algoritmo *AsterDTM*. Esta seria outra possibilidade para o ajuste dos MDEs gerados a partir de imagens ASTER, caso sejam encontrados problemas semelhantes aos desta pesquisa (valores inferiores à referência).

Tabela 1. Parâmetros estatísticos dos modelos digitais de elevação (área de estudo).

MDE	Mínimo (m)	Máximo (m)	Média (m)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
ASTER (2002)	650	1074	747,00	32,24
ASTER E SRTM (2002)	695	1095	768,37	32,10
ASTER (2003)	-75	985	63,47	158,18
ASTER E SRTM (2003)	-124	1003	81,38	158,79
ASTER (2004)	-75	977	68,31	160,23
ASTER E SRTM (2004)	-135	913	83,17	160,05

## 5. Conclusões

Este estudo concluiu pela boa qualificação do MDE do ASTER para representar a superfície. Os MDEs apresentaram elevada correlação com as cartas topográficas oficiais em escala compatível, necessitando, entretanto, da aplicação de um *offset* para ajuste, pois as altitudes foram subestimadas. A agregação de dados SRTM ao processamento também se mostrou uma possibilidade factível para evitar a subestimação. A diferença encontrada pode ter ocorrido em função de discrepâncias no processamento do programa utilizado.

É importante citar que a interferometria pode levar a melhores resultados do que a estereoscopia. Por outro lado, a vantagem dos dados ASTER em relação a dados como os do

SRTM está na maior resolução espacial. Os resultados ainda são preliminares e novos testes deverão ser efetuados, inclusive no intuito de efetuar uma avaliação planimétrica do MDE. Os resultados poderão ser comparados com o processamento aplicando-se outros algoritmos disponíveis em *software* apropriado, bem como com o produto ASTER nível 3 (MDE), disponível para aquisição sob demanda, com 30 m de resolução. É possível que, utilizando um MDE ASTER com resolução mais grosseira, seja minimizado o ruído bem como dispensada a aplicação da filtragem. Além disso, poderão ser extraídos MDEs para as mesmas áreas de estudo efetuando o processamento de imagens de outros sensores, respeitadas na avaliação as diferenças em função da resolução espacial.

### Agradecimentos

Ao Lênio Galvão, pelo apoio com o *AsterDTM* e ao Michael Steinmeyer pelo suporte técnico. Ao Carlos Roberto de Souza Filho, pelo acesso às imagens ASTER. Ao INPE e à PG-SER pelo financiamento do trabalho de campo e ao CNPq pela bolsa de estudo.

### Referências

- Abrams, M.; Hook, S.; Ramachandran, B. **ASTER users handbook**. Pasadena: JPL, 1999. 93p.
- Barros, R. S.; Cruz, C. B. M. Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1243-1250.
- Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG). **Vila Militar**. 1. ed. Rio de Janeiro: DSG, 1963, Folha SF-23-Q-IV-3. Escala 1: 50.000.
- \_\_\_\_\_. **Baía de Guanabara**. 1. ed. Rio de Janeiro: DSG, 1965, Folha SF-23-Q-IV-4. Escala 1: 50.000.
- Godoy, S. C.; Diaz, E. G. Aplicación del modelo digital de elevaciones de ASTER en geomorfología. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2405-2412.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Osasco**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1984a, Folha SF-23-Y-C-VI-1. Escala 1: 50.000.
- \_\_\_\_\_. **São Paulo**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1984b, Folha SF-23-Y-C-VI-2. Escala 1: 50.000.
- Melgaço, L. M.; Souza Filho, C. R.; Steinmeyer, M. Comparação entre modelos digitais de elevação gerados por sensores ópticos e por radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1215-1220.
- Neter, J.; Kutner, M. N.; Nachtsheim, C. J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models**. 4<sup>th</sup> ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1996. 791 p.
- Oliveira, C. G. **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM)**. 2005. 184p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.
- Parma, G. C. Processamento de imagem ASTER para obtenção do MDE e da imagem ortoretificada do município de Palhoça, SC, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6019-6026.
- Rio de Janeiro. Prefeitura do Município do Rio de Janeiro. **Armazém de dados**. Disponível em: <<http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 18/07/2006.
- Sulsoft. **AsterDTM 2.2: instalation & user's guide**. Porto Alegre: Sulsoft, 2005. 24p.
- Zaloti Júnior, O. D.; Freitas, C. C.; Sant'Anna, S. J. S.; Andrade, R. A. M. Avaliação do modelo digital do terreno extraído de dados do SRTM – uma abordagem baseada na declividade, aspecto e uso/cobertura do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5043-5050.