

---

# COMPARAÇÃO DE TRÊS MDE PARA GEOCODIFICAÇÃO DE IMAGENS ASAR

HENRIQUE LUIS GODINHO CASSOL 1

ELISABETE CARIA MORAES 2

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR  
[henrique@dsr.inpe.br](mailto:henrique@dsr.inpe.br), [bete@ltd.inpe.br](mailto:bete@ltd.inpe.br)

---

**RESUMO** - O objetivo deste estudo foi avaliar três Modelos Digitais de Elevação (MDE) para a geocodificação de imagens *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ASAR). Os MDEs usados foram gerados por interferometria através dos dados do SRTM, estereoscopia a partir de dados ASTER e interpolação de pontos altimétricos das curvas de nível de cartas topográficas na escala 1:50.000. A avaliação dos resultados envolveu a análise visual da geocodificação da imagem, bem como a avaliação de deslocamento horizontal de pixels pós-processamento. A precisão de deslocamento vertical foi verificada pela diferença entre as alturas obtidas pelos MDEs e as altitudes derivadas das Referências de Nível (RN) do Serviço Geodésico Brasileiro (SGB). Visualmente, os três MDEs foram adequados para a geocodificação, no entanto, os dados gerados pelo MDE SRTM e ASTER apresentaram menores deslocamentos horizontais. Além disso, o MDE SRTM mostrou uma tendência a superestimar as altitudes (*bias*). Portanto, concluiu-se neste estudo, que o MDE ASTER e gerado a partir da Carta Topográfica foram os mais adequados para geocodificação de imagens ASAR.

**ABSTRACT** - The objective of this study was evaluate among three digital elevation models (DEM) which best suits to geocoding of an Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) image. The three DEM used were generated by interferometry data from SRTM, stereoscopy from ASTER data and interpolation by altimetric points from the contour lines of topographic maps at 1:50.000 scale. Data evaluation involved visual analysis from geocoding image, as well as the evaluation of horizontal displacement post-processing pixels. The accuracy of vertical displacement was verified by the difference between the altitudes obtained by DEM and the altitudes derived from references level (RL) of the Brazilian Geodesic Service (GBS). Visually the three DEM were suitable for geocoding, however, the DEM data generated by the SRTM and ASTER achieved a lower horizontal displacement. Moreover, the SRTM DEM showed a tendency to overestimate the altitudes (Bias). In this study it is concluded that the ASTER DEM and generated by topographic maps were better suited for the ASAR image geocoding.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Assim como as imagens ópticas, as imagens adquiridas por sensores Radares contêm distorções geométricas que são inerentes ao seu processo de aquisição. Porém, estas distorções são muito diferentes daquelas encontradas para sensores remotos ópticos. Sistemas de Radar são sensores que funcionam através de visadas laterais e, por consequência, os parâmetros geométricos dominantes na cena são: o ângulo de incidência, o ângulo de incidência local (pixel), a direção de visada e o comprimento de onda, assim como, as características da superfície, tais como declividade, inclinação e estrutura (Globe SAR, 2012).

A visada lateral do sistema de Radar resulta em algumas distorções geométricas, como a distorção de escala da geometria *slant-range* e distorções decorrentes das variações de relevo (JENSEN, 2009; ROSICH; MEADOWS, 2004). As primeiras são corrigidas pela correção da imagem para o alcance do terreno (*ground-range*) ao passo que a última corrige-se mediante uso de um Modelo Digital de Elevação (MDE). O processo de correção dos efeitos da topografia na posição das feições é chamado de ortorretificação ou geocodificação. Correções no terreno são desejadas para compensar estas distorções de forma que a representação geométrica da imagem seja a mais próxima possível do mundo real. Devido à aquisição lateral, as imagens do radar de abertura sintética SAR (*Synthetic Aperture Radar*) são afetadas pelas distorções topográficas com muito mais intensidade que as imagens ópticas (WOODHOUSE, 2006).

Esta correção é necessária quando se deseja extrair informações dimensionais das imagens ou quando se deseja produzir mosaicos de cenas tomadas em diferentes datas de aquisição (VEIGA e MONTEIRO, 2009). Segundo Small e

Schubert (2008), as distorções induzidas pelo terreno podem degradar ou até mesmo inviabilizar a extração de informações quantitativas para uma série de aplicações, como mapeamento de florestas e de áreas agrícolas.

Na Figura 1, o diagrama da esquerda apresenta o posicionamento dos pontos do relevo segundo o plano de visada lateral do sistema SAR. No diagrama da direita, estes mesmos pontos são projetados ortogonalmente no plano equipotencial gravitacional (imagem geocodificada).

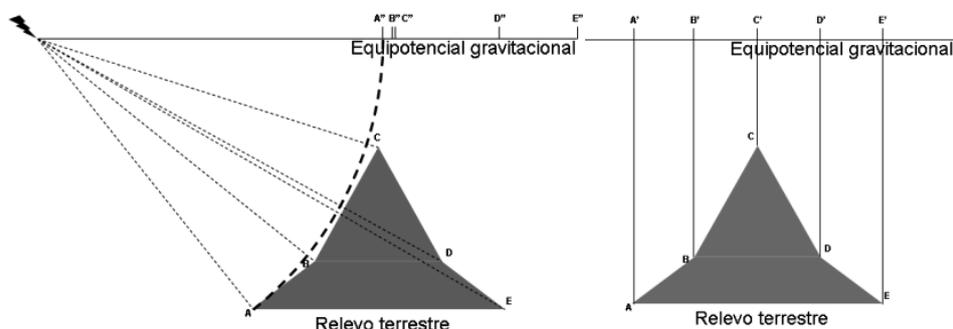


Figura 1 - Geometria da imagem SAR (esquerda) e geometria da imagem geocodificada (direita). Modificado de Veiga e Monteiro (2009).

Basicamente, existem três métodos utilizados para realizar o processo de correção geométrica da cena: i) baseados em modelos não físicos (ditos empíricos); ii) modelos rigorosos e iii) os modelos híbridos (KARJALAINEN, 2007). Os modelos não físicos são capazes de realizar a transformação de um sistema de coordenadas da imagem para o sistema de coordenadas terrestre, mas não possibilita compatibilizar diretamente a localização e movimento do sistema sensor com relação ao sistema de projeção da Terra (TOUTIN, 2004).

Nos modelos rigorosos, os parâmetros físicos de propagação da radiação eletromagnética entre o objeto e o sistema de coordenadas da imagem são utilizados para modelar a geocodificação da forma mais exata possível (CURLANDER, 1982). Os modelos híbridos mesclam os dois modelos anteriores.

O modelo rigoroso de geocodificação SAR é baseado no efeito *Doppler (range-Doppler)* pela equação que segue (CURLANDER, 1982):

$$f_{DC} = 2(\vec{s} - \vec{p}) \cdot (\vec{s} - \vec{p}) / \lambda |\vec{s} - \vec{p}| \tag{1}$$

$$R = |\vec{s} - \vec{p}| \tag{2}$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $f_{DC}$  é o deslocamento Doppler da frequência,  $R$  é o deslocamento medido pelo sensor SAR,  $\vec{p}$  e  $\vec{p}$  são os vetores posição e velocidade dos pontos de controle, respectivamente e  $\vec{s}$  e  $\vec{s}$  são os vetores posição e velocidade do sensor SAR, respectivamente. Usando estas equações é possível realizar a transformação das coordenadas entre o objeto e o sistema de coordenada da imagem. Assim, os parâmetros desconhecidos são os vetores posição e velocidade do sensor SAR em função do tempo, bem como a frequência *Doppler* central da imagem (KARJALAINEN, 2007).

Os vetores posição e velocidade  $\vec{p}$  e  $\vec{p}$  são desconhecidos, mas podem ser obtidos de um modelo de correção topográfica que relaciona um pixel  $\vec{p}$  ( $p_x, p_y$  e  $p_z$ ) da imagem bruta com um ponto da superfície representativa da Terra, pelos parâmetros de entrada de um modelo de elipsoide de revolução  $(\lambda, \Phi, H)_{mod}$ , derivado de um determinado *Datum*, como o WGS-84, acrescido de uma altitude do terreno,  $h$ , pela Equação 3 (MURA, 2001):

$$\frac{p_x^2 + p_y^2}{(a+h)^2} + \frac{p_z^2}{(b)^2} \tag{3}$$

Onde  $a$  e  $b$  são os semieixos maior e menor do elipsoide de revolução, respectivamente e  $h$ , a altura do pixel em relação ao elipsoide.

Este modelo corrige as distorções decorrentes dos diferentes ângulos de visada, com relação à topografia. Assim, a imagem resultante parece ser adquirida com visão perpendicular em todos os pixels, isto é, a imagem é representada numa projeção ortogonal. O resultado da geocodificação é dependente da acuidade do MDE e da resolução espacial da imagem de Radar com relação à resolução espacial do MDE utilizado para a correção.

Além disso, um importante aspecto da geocodificação é que esta envolve mudanças nas propriedades da imagem, sejam elas pelo deslocamento dos pixels ou pela projeção de *slant* para *ground range*, através do processo de reamostragem (WOODHOUSE, 2006).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar a geocodificação de uma imagem ASAR, datada de 30/03/2007, utilizando-se de três MDE. A geocodificação gerada por cada modelo foi avaliada visualmente e pela análise

quantitativa dos Pontos de Controle (PC), referentes às três cenas, coletados na imagem não geocodificada (deslocamento horizontal) e pelas referências de nível RN, obtidas no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), referentes às altitudes cotadas pelo Serviço Geodésico Brasileiro (SGB) – deslocamento vertical.

## 2 METODOLOGIA DO TRABALHO

Uma cena de radar de abertura sintética – ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) do satélite ENVISAT, datada de 30 de março de 2007, localizada próxima a Osório – RS, entre as coordenadas 28°58'15.08"S, 49°29'7.08"W e 30°7'42.01"S, 50°47'5.29"W, foi utilizada. O ENVISAT possui órbita descendente, heliossíncrona, com visada lateral à direita da passagem do satélite (15 – 45°). O sensor ASAR *single look complex*, banda C ( $\lambda \approx 5,8\text{cm}$ ), possui polarização paralela vertical VV, com resolução espacial de 12,5 m (*ground range*) e nominal de 30 m no modo *Stripmap* - faixas de 5 x 5 Km (ESA, 2012).

As 20 referências de nível (RNs), pertencentes à rede altimétrica do IBGE, variam das altitudes entre 8,8 m e 970,88 metros acima do nível do mar, caracterizando um terreno bastante ondulado (Figura 2).

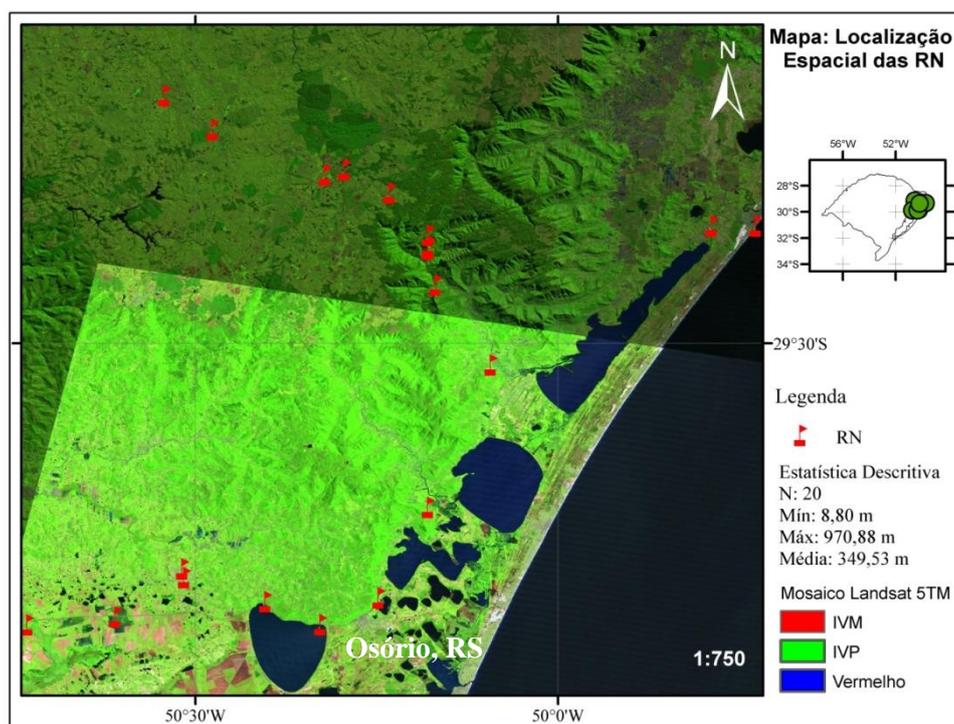


Figura 2 – Localização espacial das Referências de Nível utilizadas para aferir as alturas dos MDEs.

### 2.1 Modelos Digitais de Elevação - MDE

#### *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*

A missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi lançada em fevereiro de 2000 e teve duração de 11 dias. À época, foi o mais completo banco de dados topográfico digital de alta resolução sobre a superfície da Terra (NASA, 2012). O SRTM foi um projeto internacional liderado pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para a geração de MDE globais, baseado em modelos interferométricos.

O mapeamento topográfico por interferometria SAR consiste na aquisição de dados, a partir de ângulos de visada diferentes. Quando as medições ocorrem simultâneas em uma mesma passagem do satélite denomina-se interferometria de passagem única. O SRTM foi desenvolvido dessa forma, contendo uma antena banda C e banda X no compartimento de carga e outra banda C e X posicionada em uma haste a 60 metros desta (JENSEN, 2009). (Fig. 3a).

A geometria de aquisição é tal que os dois radares e qualquer objeto no solo formam um triângulo (Fig. 3b). Sabendo-se a distância (*range*) entre cada um dos radares e a superfície ( $r_1$  e  $r_2$ ) e a distância entre os radares ( $B$ ) e o ângulo da linha base,  $\alpha$  (em relação à horizontal), pode-se calcular a altura ( $h$ ) da superfície, através de cálculos trigonométricos seno e cosseno.

Pela regra do cosseno, a altura de um pixel na superfície pode ser calculada por (Eq. 4):

$$h = r_1 \cos \theta \quad (4)$$

Onde se resolve  $\theta$  e  $h$  em cada um dos pixels da imagem. Com base nestas informações de alturas por pixel é possível gerar o MDE. O MDE formado possui resolução espacial de 90 metros. Uma cena SRTM, fuso 22s, formato GeoTIFF no sistema WGS 84 foi utilizada para a ortorretificação.

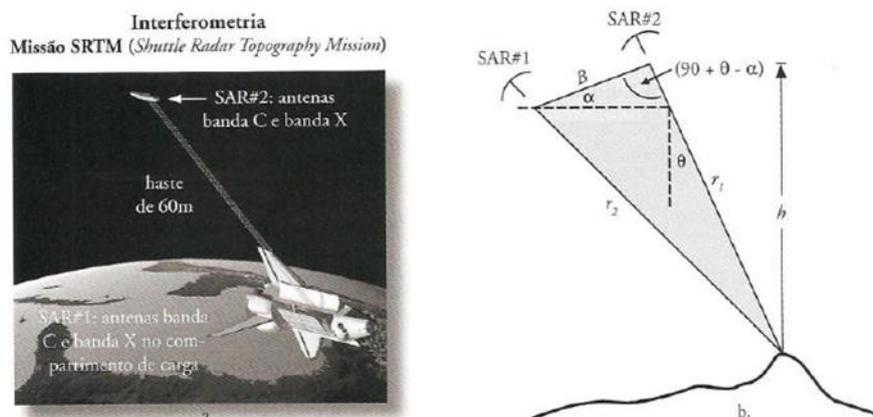


Figura 3 - a) Localização dos sistemas radares SAR, no ônibus espacial *Endeavor*, usados no SRTM. b) Geometria de aquisição de dados interferométricos entre os dois sistemas SAR. Fonte: Jensen (2009).

#### Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – ASTER

O ministério da economia, indústria e comércio do Japão (METI), juntamente com a NASA (EUA) anunciaram o lançamento do ASTER *Global Digital Elevation Model* (GDEM) em junho de 2009. O ASTER GDEM consiste na coleção de imagens estéreo-pares de parte do globo terrestre, coletadas pelo sistema sensor ASTER, a bordo do satélite Terra (ASTER GDEM, 2012).

Para obtenção dos dados de elevação da superfície, o sistema ASTER opera nas bandas 3N (nadir) e 3B (*backward*) correspondentes ao infravermelho próximo ( $0,78 - 0,86 \mu\text{m}$ ). A altura de um ponto na superfície terrestre ( $h_0$ ) é calculada por estereoscopia, segundo a equação da paralaxe:

$$h_0 = (H - h)x \frac{dp}{(P+dp)} \quad (5)$$

Em que  $H - h$  é a altitude da órbita acima do nível do solo;  $P$  é a paralaxe absoluta e  $d_p$  é a paralaxe diferencial.

Os dados têm resolução espacial de 30 metros, georreferenciadas no sistema WGS 84, formato GeoTIFF e 16 bits de resolução radiométrica (RODRIGUES, DEBIASI e SOUZA, 2010). Uma cena ASTER GDEM correspondente à área de estudo foi utilizada para gerar a imagem ortorretificada.

#### Carta Topográfica 1:50.000

A digitalização das cartas topográficas 1:50.000 foi um projeto desenvolvido pelo Laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS). As principais feições das cartas 1:50.000 da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército foram vetorizadas, inclusive as curvas de nível (Hasenack e Weber, 2010).

As curvas de nível, de 20 em 20 metros, foram utilizadas para gerar um arquivo *Raster* de 30 metros de resolução espacial, contendo as cotas topográficas por pixel. As curvas foram inicialmente transformadas em pontos, espaçados a cada 100 metros no programa ArcGIS 9.2, extensão *Xtools Pro 4.0* >> *Convert polylines to points*.

Posteriormente, na extensão do *Arctoolbox* >> *3D Analyst* >> *Raster Interpolation* >> *Natural Neighbor*, o arquivo *Raster* foi gerado, a partir dos pontos cotados, pelo método de reamostragem inverso do quadrado da distância e o arquivo foi salvo no formato GeoTIFF, no sistema de referência WGS 84.

## 2.2 Geocodificação

Antes de realizar a ortorretificação, a imagem bruta ASAR, com geometria *ground-range*, foi pré-processada.

O pré-processamento da imagem consistiu nos seguintes passos:

- i) Flip da cena – inversão das linhas pelas colunas;
- ii) Calibração radiométrica – conversão dos contadores digitais para decibéis;
- iii) Redução do speckle pela aplicação do filtro de mediana de dimensão 3x3 pixels;

Todas estas etapas foram feitas no software livre NEST 4C – *Next Esa SAR Toolbox*, da agência espacial europeia. Os diferentes dados de MDEs foram usados para gerar a imagem ortorretificada da área. O processamento foi realizado no software NEST 4C: *Geometry >> Terrain Correction >> Range-Dopler Terrain Correction*. Este método utiliza-se de informações disponíveis, pertencentes nos metadados ou nos dados externos, como anotações do tempo de retorno de sinal do radar, parâmetros de conversão de alcance inclinado para alcance do terreno, juntamente com os dados de entrada dos MDEs, para obter a ortorretificação de forma precisa (SMALL e SCHUBERT, 2008). O método de reamostragem, tanto da imagem quanto do MDE de saída, foi o do vizinho mais próximo (*Natural Neighborhood*).

### 2.3 Análise dos resultados

Os resultados das ortorretificações foram avaliados sob os seguintes aspectos: o deslocamento horizontal dos pixels (em decibéis) e o deslocamento vertical (em metros), aferido pelas altitudes das RNs.

A análise do deslocamento horizontal envolveu a coleta de 20 Pontos de Controle (PC), na imagem ASAR não geocodificada, correspondentes geograficamente aos PC das imagens ortorretificadas. Os PC foram deliberadamente escolhidos em áreas típicas de distorções geométricas de Radar, cinco para cada característica de relevo, que foram: encurtamento de rampa, inversão de relevo e sombra (*Foreshortening, Layover e Shadow*, respectivamente), além de cinco em Terreno Plano, usados como testemunha.

O deslocamento vertical, por sua vez, foi avaliado com base na utilização de 20 RNs - pertencentes à rede altimétrica do SGB e disponibilizadas pelo IBGE - contendo as altitudes verdadeiras (IBGE, 2013). As altitudes obtidas pelos diferentes MDE foram comparadas às altitudes oriundas das RN do SGB, com base nas seguintes estatísticas: Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e relativo (RMSE%), vieses (Bias) e vieses relativos (Bias%). Neste caso, supõe-se que o resultado do MDE, não tendencioso, que melhor estime a altitude, resultará, conseqüentemente, em uma melhor ortorretificação da imagem ASAR. As análises estatísticas foram computadas em planilha eletrônica Excel®.

Na Figura 4, tem-se o fluxograma metodológico da geocodificação, bem como o processamento da análise dos resultados.

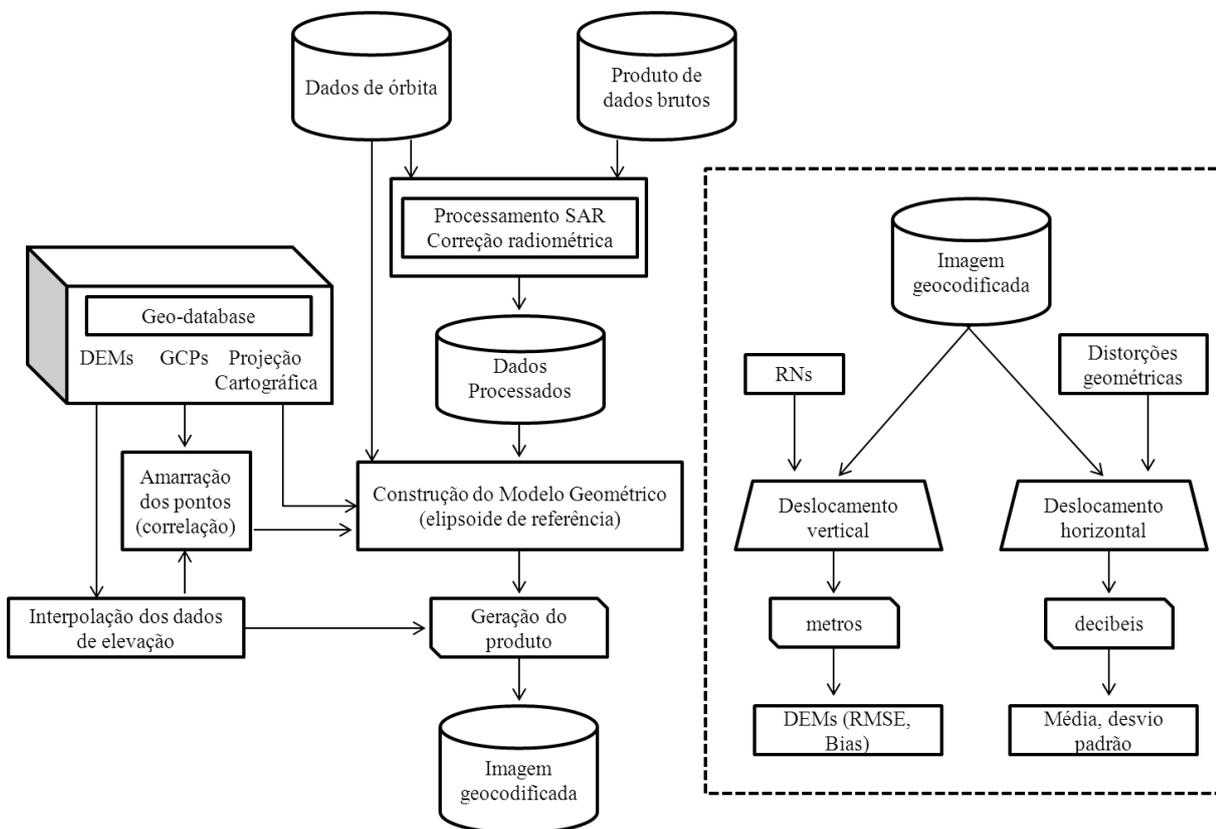


Figura 4 – Fluxograma metodológico da geocodificação e da análise de resultados (caixa pontilhada).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5, têm-se o resultado da geocodificação feita com os diferentes MDE utilizados. Nota-se, visualmente, que os resultados se assemelham. As maiores diferenças são encontradas nos locais onde o relevo é mais acidentado, especialmente, nas áreas de distorções típicas de Radar, como o encurtamento de rampa (áreas claras na imagem).

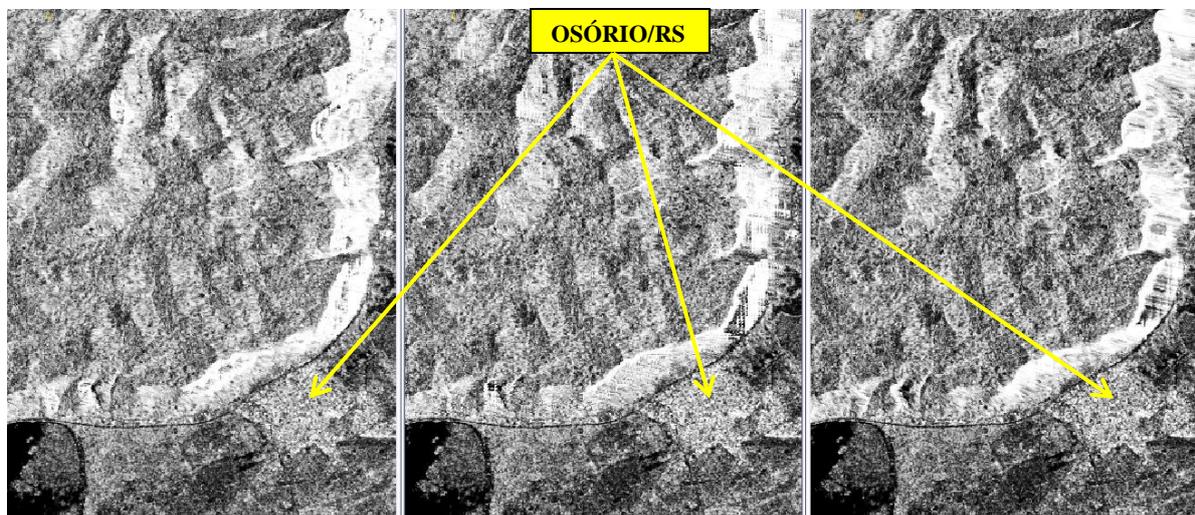


Figura 5 – Detalhe da escarpa do planalto (longa faixa clara) e da cidade de Osório/RS na imagem ortoretificada gerada pelos três MDE: SRTM (esquerda), ASTER (centro) Carta (direita).

Na composição colorida RGB (Fig. 6), com os três MDE empregados, um em cada canal, comprovam-se os locais com maiores diferenças entre as imagens ortoretificadas. Estes são correspondentes às áreas claras na Figura 5 e coloridas na Figura 6. Áreas cinza constituem-se por conterem baixas diferenças entre as imagens geradas pelos MDEs, pois a intensidade de resposta de sinal retroespalhado apresenta-se em mesma escala (terrenos planos).

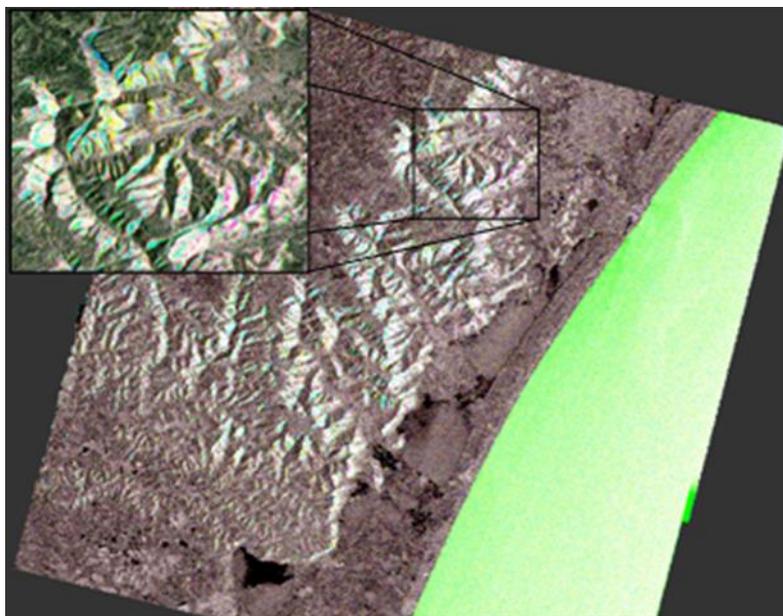


Figura 6 – Composição colorida RGB, gerada a partir das três imagens ortoretificadas, utilizando-se de um MDE por canal (*Red*-SRTM; *Green*-ASTER; *Blue*-Carta). Em detalhe, feições coloridas são compostas conforme a intensidade de sinal retroespalhado registrado pelo sensor, p. ex., feições ciano são resultado da soma de intensidades proporcionais de sinais gerados pelo MDE ASTER e MDE Carta, soma das cores verde e azul, respectivamente.

### 3.1 Avaliação Quantitativa

Na Tabela 1, encontram-se a média e o desvio padrão dos valores de retroespalhamento (sigma Nought,  $\sigma^0$ ) dos PC coletados. Conforme esperado, as diferenças entre as médias dos valores de  $\sigma^0$ , obtidas após a geocodificação com os distintos MDE, para as áreas planas foram baixas, se comparadas à imagem não geocodificada (georreferenciada), em função da desnecessidade de correção topográfica. Houve um baixo deslocamento horizontal dos pixels.

Tabela – Análise do deslocamento horizontal dos pixels dos PC por característica de relevo e MDE.

Característica	MDE	Média (db)	Desvio Padrão (db)
Plano	Georreferenciada	-9,9780	6,06282
	SRTM	-10,7380	6,73543
	ASTER	-9,1860	7,23295
	Carta	-10,4240	7,46154
Shadow	Georreferenciada	-0,9040	3,21021
	SRTM	-5,0880	4,51515
	ASTER	-5,6580	6,48930
	Carta	-7,3000	6,22740
Layover	Georreferenciada	-13,6740	3,46903
	SRTM	-5,0640	3,79656
	ASTER	-4,4760	3,62968
	Carta	-3,2320	5,73861
Foreshortening	Georreferenciada	-12,1500	3,22106
	SRTM	-5,5380	5,43033
	ASTER	-4,9320	4,78597
	Carta	-6,4400	4,63646
Total	Georreferenciada	-9,1765	6,36032
	SRTM	-6,6070	5,39542
	ASTER	-6,0630	5,57533
	Carta	-6,8490	6,18446

Por outro lado, nos locais onde se observaram distorções geométricas na imagem, as diferenças entre as médias dentre os MDEs e entre os MDEs e a imagem georreferenciada foram mais acentuadas. Pode-se notar que os resultados da ortoretificação para os valores médios de  $\sigma^0$ , obtidos a partir dos MDE do SRTM e ASTER foram bem próximos uns dos outros. Nota-se também que a área de *shadow* (sombra) é caracterizada pela ausência de retorno e que na imagem georreferenciada o valor de retroespalhamento é quase nulo (-0,9 db), ao passo que nas imagens geocodificada esta recebeu valores superiores a -5 decibéis. Isto se deve ao processo de reamostragem das cenas durante a geocodificação (WOODHOUSE, 2006).

*Layover* é um problema em imagens SAR, pois é formado por uma combinação de diferentes sinais provenientes de diferentes partes do terreno. Nem mesmo as técnicas interferométricas mais avançadas são hábeis para distinguir os distintos sinais retroespalhados do terreno com propriedade. O que ocorre nestas áreas, após a geocodificação, é a reprodução dos pixels (“*stretched out*”) em toda a área que apresenta o fenômeno de *layover* de modo que os pixels contenham os mesmos valores de  $\sigma^0$  e, por isso, os resultados da cena foram bem semelhantes nestes locais. O único meio de contornar as distorções de *shadow* e *layover* seria combinar a aquisição de cenas da mesma área tomadas em direções opostas (WOODHOUSE, 2006). No caso do *foreshortening* há também uma reprodução dos pixels vizinhos, como ocorre com o *layover*, mas como os sinais de retorno são mais comportados e conhecidos, o problema não é tão grave no resultado da geocodificação quanto o que ocorre com o *layover*.

A partir da comparação das coordenadas altimétrica ortométricas das estações geodésicas do SGB com as coordenadas altimétrica oriundas dos MDE, obteve-se os seguintes resultados estatísticos (Tabela 2). Os resultados demonstram que há semelhanças entre as altitudes obtidas pelos MDEs e as aferidas pelas RNs, comprovadas pelos valores próximos de desvios padrões, RMSE, RMSEr e Erros Padrões, encontrados entre os MDE e as RNs. Rodrigues, Debiasi e Souza (2010) encontraram RMSE de 16,16 metros, entre as altitudes das RNs e do ASTER GDEM e que estes resultados se encontram dentro dos 20 metros de acurácia vertical do modelo (ASTER GDEM, 2012).

Contudo, verifica-se uma tendência de superestimava nas altitudes oriundas do MDE SRTM (Bias = 4,72). Pelo teste *t* de *student* não se rejeita  $H_0$ , ao nível  $\alpha = 0,05$ , de que não há tendência significativa entre os valores estimados e os observados, isto é, há viés significativo nas medidas. Este resultado pode-se dever ao fato de o MDE SRTM possuir

menor resolução espacial (90m) quando comparada à resolução espacial dos MDE ASTER e MDE Carta (ambos com 30m).

Tabela 2 – Estatísticas geradas pela diferença entre as altitudes do RN e os MDEs.

	MDE SRTM	MDE ASTER	MDE Carta
Mínimo (m)	-31,89	-46,12	-64,12
Máximo (m)	50,20	34,20	37,67
Desvio Padrão (m)	18,42	18,50	19,93
Erro Padrão (m)	4,12	4,14	4,46
RMSE <sup>a</sup> (m)	18,57	18,04	19,56
RMSE <sup>b</sup> r (%)	5,24	5,17	5,56
Bias <sup>c</sup> (m)	4,72	-0,43	2,32
Bias <sup>d</sup> (%)	1,33	-0,12	0,66
t <sup>e</sup>	0,73	-9,68	1,92

$${}^a \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}; {}^b \text{RMSEr} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{y_{\text{med}}}}; {}^c \text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}); {}^d \text{Biasr} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})}{y_{\text{med}}} \times 100;$$

<sup>e</sup> t Significância de Bias com n-1 graus de liberdade é baseado em  $t = \frac{1}{\text{Bias}} \times \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$  onde  $\sigma$  é o desvio padrão do resíduo ( $y_i - \hat{y}$ );  $y_i$  = valores observados;  $y_{\text{med}}$  = média dos valores observados;  $\hat{y}$  = valores estimados; n = número de observações;  $t_{\text{tabelado}}(19; 0,05) = 1,729$ .

#### 4 CONCLUSÕES

Visualmente, os três MDE se mostraram adequados à geocodificação de imagens ASAR, com a extensão da resolução dos pixels que se encontram na face paralela à antena. O deslocamento horizontal foi maior na imagem ortoretificada gerada a partir do MDE Carta, embora nenhuma análise estatística pormenorizada tenha sido feita.

Os modelos gerados a partir dos MDEs do ASTER e da Carta obtiveram os melhores resultados estatísticos, com tendência, *Bias*, não significativa para as altitudes estimadas em relação às referências de nível (RNs). O viés (*Bias*) foi significativo nas altitudes geradas a partir do MDE SRTM. O viés foi positivo, com tendência a superestimativa, devido à menor resolução deste MDE com relação à resolução nominal do sensor ASAR, embora não tenha sido o maior RMSE.

#### Referências

ASTER. Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer. **Global Digital Elevation Model (GDEM)**. Disponível em: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Acesso em: 20 de maio de 2014.

COSTA, E.R., SILVA, M.A.O., NEVES, P.E., MACHADO E SILVA, A.J. Ortoretificação: um passo a mais no processamento de imagens CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 827-833.

CURLANDER, J. Location of space borne SAR imagery. **IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing**, v. 20, n. 3, p. 359–364, 1982.

ESA. European Spatial Agency. **Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)**. Disponível em: [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace/Envisat\\_PT/SEM0N5TP82G\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace/Envisat_PT/SEM0N5TP82G_0.html). Acesso em: 20 de maio de 2014.

GLOBE SAR. **Canada Centre for Remote Sensing**. Disponível em: [http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/programs/globsar/glsarmain\\_e.html](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/programs/globsar/glsarmain_e.html). Acesso em: 28 de maio de 2014

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul**. Escala 1:50.000 [CD-ROM]. Porto Alegre: Série Geoprocessamento. 2010.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

KARJALAINEN, M. Geocoding of synthetic aperture radar images using digital vector maps. **IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing**, v. 4, n. 4, 2007.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)**. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>. Acesso em: 15 de maio de 2014.

RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, 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, 3, 2010, Recife. **Anais...** Recife, 2010. p. 001-005.

ROSICH, B.; MEADOWS, P. **Absolute calibration of ASAR Level 1 products**, Technical Note: ESA/ESRIN, ENVI-CLVL-EOPG-TN-03-0010, Issue 1, Rev. 5, October 2004.

SMALL, D., SCHUBERT, A., **Guide to ASAR Geocoding**, Issue 1.0, 19.03.2008.

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

WOODHOUSE, I.H. **Introduction to microwave remote sensing**. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. 2006. 357p.

VEIGA, R. Q.; MONTEIRO, M. V. T. Ortoretificação de imagens SAR do R-99. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 1905-1912.