

Modelo digital de elevação da aeronave R-99: estudo sobre a acurácia dos dados altimétricos

Digital elevation model of R-99 aircraft: study about altimetry accuracy

Modelo digital de elevación de la aeronave R-99: estudio sobre la precisión de los datos altimétricos

Cap Av Breno Ricardo de Araújo Leite
Especialização em Geoprocessamento pela UNB
Base Aérea de Anápolis (BAAN)
Segundo Esquadrão do Sexto Grupo de Aviação (2/6 GAV)
Anápolis - GO
guardiao78@gmail.com

Cap Esp Fot Éden Jorge Machado Bezerra
Especialização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE - CRS
Base Aérea de Anápolis (BAAN)
Segundo Esquadrão do Sexto Grupo de Aviação (2/6 GAV)
Anápolis - GO
edenj@uol.com.br

RESUMO

O Radar de Abertura Sintética da aeronave R-99 (SAR R-99) possui vários modos de operação, sendo um dos mais importantes o Interferometric SAR (InSAR). A principal finalidade do InSAR é gerar um modelo numérico do relevo, conhecido por Modelo Digital de Elevação (MDE), que permite a visualização da imagem em formato tridimensional e a geração de mapas topográficos, motivo pelo qual o SAR R-99 foi incluído no Projeto Cartografia da Amazônia. Apesar disso, existem poucos estudos realizados acerca da precisão desses dados, principalmente em relação ao dado altimétrico. Portanto, o objetivo deste trabalho é comparar a altimetria do MDE gerado pelo SAR R-99 com o MDE gerado por uma carta topográfica e classificar o MDE do SAR R-99 em conformidade com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e o *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), a partir da avaliação da acurácia da altimetria. Para a avaliação quantitativa (estatística) foram selecionadas amostras no MDE topográfico e amostras homólogas no MDE do SAR R-99, cuja distribuição e espaçamento seguiram os critérios da metodologia do NSSDA. Considerando os valores das alturas para os dois MDE, calculou-se a correlação existente e o resultado obtido permitiu concluir que o MDE do SAR R-99 gerado no modo interferométrico atende às especificações do PEC para a classe "A" na escala de 1/100.000.

Palavras-chave: Modelo digital de elevação. SAR R-99. NSSDA. Interferometria.

Recebido / Received / Recebido
22/09/12

Aceito / Accepted / Acepto
21/02/13

ABSTRACT

The Synthetic Aperture Radar of R-99 aircraft (SAR R-99) has many operations modes and the Interferometric SAR (InSAR) is one of the most important. The main objective of InSAR is to generate a Digital Elevation Model (DEM) that permits visualization of images in three dimensions and generation of topographic maps. It will be used in the Cartography of Amazon Project, but there aren't many studies about the accuracy of this data, specifically about the altimetry. Thus, the aim of this study is to compare the altimetry of the DEM generated by the SAR R-99 with the DEM generated from a topographic map and classify it in accordance with the Cartographic Accuracy Standard (Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC) and the National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) from the evaluation of the accuracy of altimetry. For the statistical analysis we selected samples in the topographic DEM and its counterparts in the DEM of the SAR R-99, whose distribution and spacing followed the criteria of the methodology of NSSDA. Considering the values of heights for both DEMs, we calculated the existing correlation, and the result was sufficient to conclude that the DEM of SAR R-99 generated by InSAR mode fits the specifications for Class "A" on the scale 1/100.000 in accordance with the PEC.

Keywords: Digital elevation model. SAR R-99. NSSDA. Interferometry.

RESUMEN

El radar de apertura sintética del avión R-99 (SAR R-99) tiene varios modos de operación, siendo uno de los más importantes el Interferometric SAR (InSAR). El propósito principal del InSAR es generar un modelo numérico del relieve, conocido como modelo digital de elevación (MDE), que permite la visualización de la imagen en formato de tres dimensiones y la generación de mapas topográficos, por lo que el SAR R-99 se incluyó en el Proyecto Cartografía de la Amazonía. A pesar de eso, hay pocos estudios sobre la exactitud de estos datos, en especial con respecto a los datos de altimetría. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es comparar la altimetría de MDE generado por SAR R-99 con MDE generado por un mapa topográfico y clasificar el MDE SAR R-99, de acuerdo con el Padrón de Exactitud Cartográfica (PEC) y el National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA), basado en la evaluación de la precisión de la altimetría. Para cuantitativos (estadística) fueron seleccionadas muestras en MDE topográficos y muestras homólogas en el MED SAR R-99, cuya distribución y el espaciamiento han seguido los criterios de la metodología NSSDA. Teniendo en cuenta los valores de las alturas para los dos MDE, se calculó la correlación y el resultado ha permitido concluir que el MDE R-99 Modo SAR, generado en el modo interferométrico, cumple con las especificaciones de la Clase "A" en la escala de 1/100.000.

Palabras clave: Modelo digital de elevación. R-SAR 99. NSSDA. Interferometría.

INTRODUÇÃO

O governo brasileiro tem executado vários planos para preservar o patrimônio amazônico e coibir práticas ilegais naquela região, porém um dos fatores que inviabilizam parcialmente esse processo é a falta de cartografia básica, o que dificulta o planejamento adequado às reais necessidades de cada localidade.

A cartografia é uma ferramenta fundamental nas atividades de planejamento, fornecendo subsídios ao processo de decisão em políticas a serem adotadas pelo governo para preservar e direcionar o processo

de desenvolvimento sustentável. Um mapeamento desatualizado ou em escala inapropriada pode gerar uma má compreensão do espaço geográfico, acarretando ações inadequadas com possível dispêndio excessivo do erário público.

As bases cartográficas na escala 1:100.000 foram confeccionadas há mais de 20 anos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Diretoria de Serviços Geográficos (DSG), e não recobrem em sua totalidade a Região Norte do Brasil, havendo ainda imensos vazios cartográficos (Figura 1).

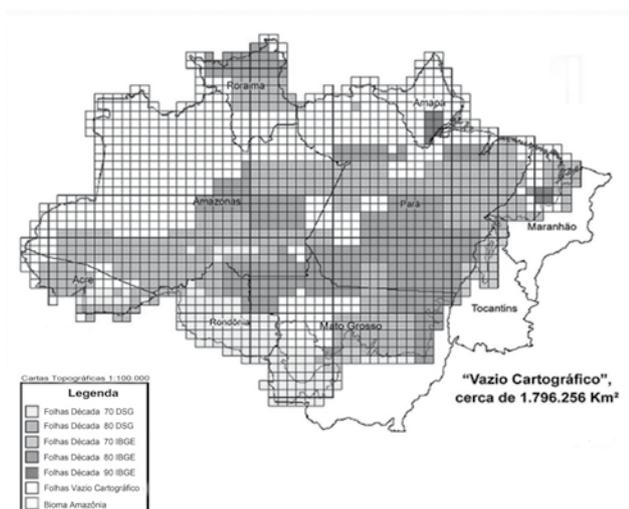


Figura 1: Mapa Índice do Levantamento Sistemático Brasileiro.
Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2013).

Para tentar sanar esses problemas, foi lançado o Projeto Cartografia da Amazônia, em 10 de setembro de 2008, coordenado pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM). O projeto já começou a ser executado pelo Governo Federal, tendo como meta a conclusão do mapeamento das cartografias terrestre, geológica e náutica de 35% da região Amazônica sem informações, contribuindo para a proteção da região e para o desenvolvimento econômico e social.

O Projeto Cartografia da Amazônia prevê que uma parte do imageamento seja realizada com o Radar de Abertura Sintética instalado a bordo das aeronaves R-99 (SAR R-99), realizando o mapeamento tanto planimetricamente quanto altimetricamente (CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA, 2008).

A utilização do radar justifica-se pela capacidade de coletar as imagens mesmo com densas camadas de nuvens, tão características dessa região. Entretanto, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar esses produtos em aplicações cartográficas.

1 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA DO R-99

O SAR da aeronave R-99 opera na faixa espectral das microondas e, devido ao seu comprimento de onda, não sofre a interferência dos elementos atmosféricos, ou seja, consegue imagear uma área mesmo que esteja em condições meteorológicas adversas ou encoberta por nuvens (HENDERSON; LEWIS, 1998). O radar opera especificamente nas bandas “X” e “L” do espectro eletromagnético. As antenas da banda “X” estão dispostas na parte dorsal da aeronave R-99 e as antenas da banda “L” na parte lateral (Figura 2).



Figura 2: Localização das antenas do SAR R-99.

O InSAR da aeronave R-99 é um modo interferométrico especial da banda “X”, no qual as antenas têm um ângulo de elevação de 11,5°, permitindo medidas de alturas a partir de informações de fase diferencial das duas antenas receptoras (SEGUNDO ESQUADRÃO DO SEXTO GRUPO DE AVIAÇÃO, 2008). É justamente esse modo que capacita o SAR R-99 a gerar o modelo numérico do relevo, conhecido por Modelo Digital de Elevação, que potencialmente pode atender à grande demanda existente, habilitando-o como instrumento a ser empregado no processo de mapeamento, gerando insumos para confecção de novas bases cartográficas e atualização das já existentes (ZALOTI JÚNIOR, 2007).

Entretanto, antes de empregar as imagens para tal fim, faz-se necessário avaliar a qualidade geométrica do dado a ser utilizado em função da escala e do tipo do mapeamento.

2 INTERFEROMETRIA RADAR

A técnica interferométrica apresentou um grande potencial na produção de mapas topográficos de alta resolução, com erros inferiores a 5 metros em altitude (MADSEN, 1993; LIN; VESECKY, 1994; ZEBKER et al, 1994). O par de imagens SAR pode ser adquirido por meio da interferometria de uma ou duas passagens do sensor. A interferometria de uma passagem é normalmente adotada em sensores aerotransportados (R-99) e se baseia no emprego de duas antenas posicionadas na mesma direção em azimute e com um pequeno deslocamento entre si (MURA, 2000).

O processo interferométrico, de forma resumida, compreende as seguintes etapas: geração do interferograma e da imagem de coerência, desdobramento de fase e geocodificação. Após o término do processo de

geocodificação, torna-se possível gerar uma malha regular de pontos por meio da técnica de interpolação, resultando no MDE (PINTO, 2007). Devido à sua complexidade, as etapas não serão abordadas aqui nesse artigo.

3 PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA (PEC)

No mundo, diversos padrões são utilizados para avaliação dos produtos cartográficos, pois cada país adota um padrão que se adequa melhor à sua necessidade. Nesta pesquisa serão empregados o padrão adotado no Brasil (PEC) e o padrão usado nos Estados Unidos da América (NSSDA).

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos (BRASIL, 1984). Essa definição pode ser traduzida da seguinte forma: noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC Planimétrico e, de forma semelhante, noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC Altimétrico.

A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão (Equação 1), sendo que são consideradas equivalentes as expressões Erro Padrão, Desvio Padrão e Erro Médio Quadrático (BRASIL, 1984).

$$PEC = 1,6449 \times EP \quad (1)$$

Onde:

PEC = Padrão de Exatidão Cartográfica; e
EP = Erro Padrão.

Baseado nesse conceito, foi estabelecido um critério para classificação de cartas quanto à exatidão das informações representadas, conforme pode ser observado na Tabela 1. Entende-se o designativo “D_{ec}” como sendo o valor da escala da carta e o termo “equidistância” refere-se à distância entre as curvas de nível.

Tabela 1: Critérios de classificação de cartas.

Classe	PEC Planimétrico	PEC Altimétrico
A	0,5 mm x Dec	1/2 equidistância
B	0,8 mm x Dec	3/5 equidistância
C	1,0 mm x Dec	3/4 equidistância

Fonte: Adaptada de Brasil (1984).

Para elucidar a tabela acima, será apresentado um exemplo para uma carta na escala de 1/100.000, cuja

equidistância entre as curvas de nível é de 40 metros. Nesse caso, a precisão da carta será definida em relação ao erro apresentado pelos pontos amostrais selecionados. Considerando-se que os valores obtidos sejam inferiores a 50 metros para o planimétrico (0,5 mm x 100.000) e 20 metros para o altimétrico (1/2 x 40 m), pode-se afirmar, com certeza, que essa carta pode ser classificada como Classe A.

4 NATIONAL STANDARD FOR SPATIAL DATA ACCURACY

Em 1991 foi criado o Conselho Governamental em Informação Geográfica para liderar e gerenciar o desenvolvimento da utilização da informação geográfica em Minnesota – EUA. Pouco tempo depois, em 1993, o Comitê de Padrões foi instituído para auxiliar os usuários de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e normatizar o uso dos dados geográficos, possibilitando que seus trabalhos fossem mais produtivos. Depois de estabelecidos os principais padrões, foi aprovado, em 1998, o *NATIONAL STANDARD FOR SPATIAL DATA ACCURACY* (NSSDA). O NSSDA preconiza a utilização da raiz quadrada do erro médio (RMSE) para estimar a precisão posicional, ou seja, a raiz quadrada da média das diferenças das amostras ao quadrado (Equação 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{MDE} - Z_{top})^2}{n}} \quad (2)$$

Onde:

ZMDE = Altitude dos pontos no MDE SAR;
Z_{top} = Altitude dos pontos no MDE topográfico;
n = Número de pontos amostrais; e
i = i – ésimo ponto.

Para uma estatística significativa é necessária a aquisição de vinte ou mais pontos de teste para um nível de confiança de 95%, independente da avaliação da precisão do tamanho das amostras e da área de cobertura. Entretanto, existe um grande rigor quanto à distribuição dos pontos amostrais, que deve obedecer às seguintes regras:

1. As amostras devem ser distribuídas de forma que pelo menos 20% dos pontos estejam localizados em cada quadrante da área de estudo; e
2. As amostras devem estar separadas espacialmente por uma distância fixa. Essa é definida pela divisão da diagonal da área de estudo por 10 (Figura 3) (FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE, 1998).

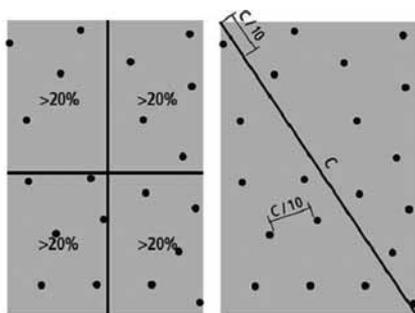


Figura 3 - Distribuição e espaçamento das amostras. Cada quadrante da área de estudo deve conter, pelo menos, 20% dos pontos amostrais, que devem estar separados por uma distância fixa, definida pela divisão da diagonal da área de estudo por 10.

Fonte: Adaptada de *Federal Geographic Data Committee* (1998).

A metodologia preconizada pelo NSSDA orienta que o RMSE deve ser multiplicado por um valor padronizado, que representa o erro padrão da média em 95% de confiança, sendo 1,7308 para o cálculo de precisão horizontal (Equação 3) e 1,9600 para o cálculo de precisão vertical (Equação 4) (*FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE*, 1998).

$$\text{CPH} = 1,7308 \times \text{RMSE} \quad (3)$$

$$\text{CPV} = 1,9600 \times \text{RMSE} \quad (4)$$

Onde:

CPH = Cálculo de Precisão Horizontal;

CPV = Cálculo de Precisão Vertical; e

RMSE = Raiz Quadrada do Erro Médio.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está localizada entre os paralelos 29° 30' 00" S e 29° 48' 00" S e entre os meridianos 053° 35' 00" W e 054° 00' 00" W, abrange parte do município de Santa Maria-RS, possui 400 km² de área e o relevo apresenta cotas que variam entre 70 e 480 metros (Figura 4).

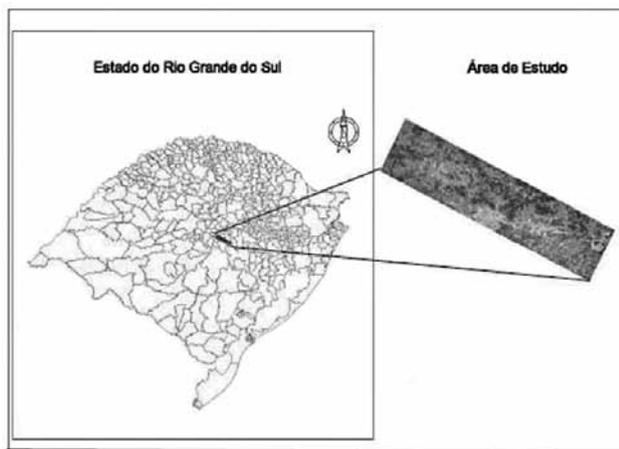


Figura 4 – Localização da área de estudo, na faixa central do Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo parte do município de Santa Maria-RS.

Para a avaliação altimétrica do MDE gerado a partir do sensor SAR R-99, fez-se necessária a aquisição dos seguintes dados:

- Modelo Digital de Elevação do SAR R-99, gerado pelo *software* do fabricante, conhecido por *Ground SAR Processing* – GSP;
- Arquivo digital de curvas de nível, extensão .shp, na escala 1/50.000, disponibilizado pela 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro; e
- *Software* SPRING, versão 5.1.3, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

A seguir, a Tabela 2 mostra como os dados utilizados nessa pesquisa foram estruturados no SPRING.

Tabela 2: Estrutura dos dados.

Especificação dos Dados	Categoria	Representação	Plano de Informação
Curvas de nível	Numérico	Isolinhas	Numérico
Grade triangular	Numérico	TIN	Numérico
Grade retangular	Numérico	Grade	Numérico
Imagem em nível de cinza	Imagem	Matriz	Imagem
MDE do SAR R-99	Numérico	Grade	Numérico

No desenvolvimento desse trabalho foram cumpridas diversas etapas, as quais são elencadas e comentadas de forma sucinta, a seguir. O modelo conceitual da metodologia está representado na Figura 5.

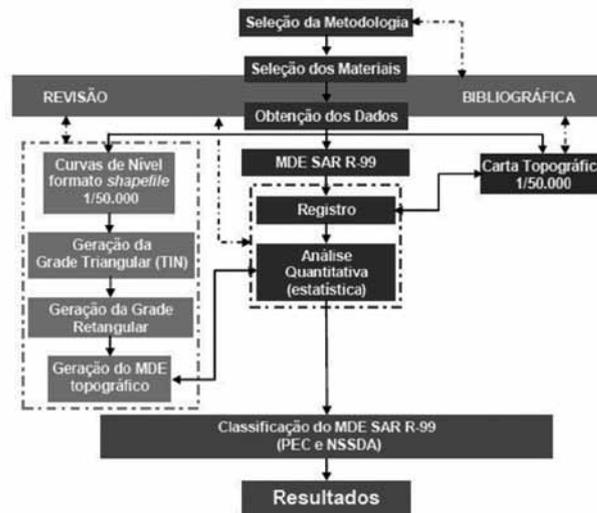


Figura 5 – Metodologia empregada na pesquisa.

Para a geração do MDE topográfico, de posse das curvas de nível, foram geradas diversas grades triangulares, utilizando a triangulação de Delaunay e foi selecionada a que obteve melhor resultado. A partir da grade triangular, foi gerada uma retangular, com a mesma resolução espacial da grade obtida da carta topográfica, para então medir-se as alturas das amostras e calcular-se o RMSE.

Já os dados brutos para a geração do MDE SAR R-99 foram coletados pela aeronave e processados pelo *Ground SAR Processing (GSP)* em partes (blocos), para serem posteriormente mosaicados. O MDE é processado em *ground range* e quantizado em *16-bit signed integer*, permitindo a codificação da altimetria em 65.536 níveis de cinza.

Para efetuar o registro da imagem radar, primeiramente foi necessário ajustar geometricamente o MDE do SAR R-99, em relação ao MDE topográfico, e para isso foram coletados um total de 10 pontos de controle, nas cartas topográficas das localidades de Santa Maria, Camobi e Arroio do Só, na escala 1/50.000. Concluído o passo inicial, e estando os dois modelos co-registrados, foram adquiridas amostras no MDE topográfico e amostras homólogas no MDE do SAR R-99, para permitir a avaliação quantitativa (estatística) dos modelos.

Foram selecionadas 20 amostras em pontos no terreno que tivessem ausência de vegetação ou apenas gramíneas, dando preferência aos cruzamentos de estradas, de modo que a altura lida do ponto não sofresse a interferência da vegetação, pois o MDE do SAR R-99 é gerado pela banda “X” e, devido ao comprimento de onda, o mesmo não penetra no dossel. A distribuição e o espaçamento das amostras adquiridas seguiram os critérios da metodologia do NSSDA conforme mostrado, anteriormente, na Figura 3.

O interessante seria que as amostras fossem coletadas em campo por meio de equipamentos GPS e refletores radar, para aumentar a precisão e garantir a confiabilidade dos dados, porém, em função da falta dos equipamentos, não foi possível realizar o trabalho de campo. A qualidade da pesquisa, contudo, não ficou prejudicada, pois havia diversos pontos marcantes em condições de serem facilmente identificados, simultaneamente, nos dois MDE.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a triangulação de Delaunay, foram geradas diversas grades triangulares e o melhor resultado foi obtido com a utilização dos seguintes parâmetros: 10 metros de tolerância de isolinhas, 200 metros para distância entre pontos de isolinhas e 10 metros para tolerância de linhas de quebra (Figura 6).

A partir da grade triangular foi gerada uma grade retangular com a mesma resolução espacial da grade obtida da carta topográfica, e percebe-se, visualmente, uma boa correlação entre o MDE topográfico e o MDE do SAR R-99 (Figuras 7 e 8).

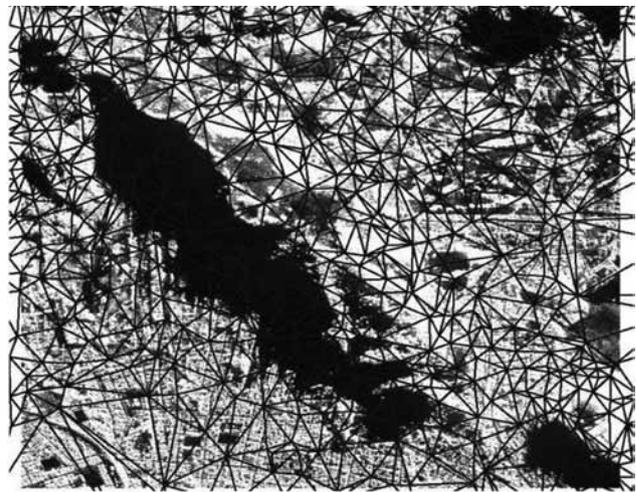


Figura 6 – Grade triangular, gerada pelo método de triangulação de Delaunay, sobreposta a uma imagem da banda L do SAR R-99, polarização VV. Os vértices e o tamanho dos triângulos dependem diretamente da variação de altitude.



Figura 7 – MDE topográfico, gerado a partir da grade retangular, onde as áreas mais claras correspondem às maiores altitudes.

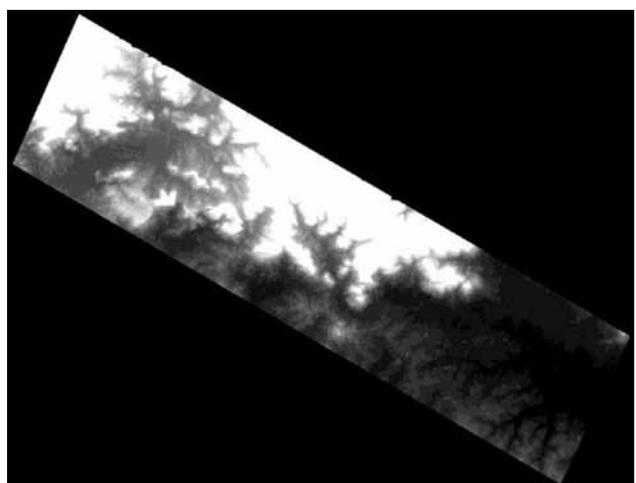


Figura 8 – MDE do SAR R-99.

O MDE do SAR R-99 visualmente apresenta boa correlação com o MDE topográfico, pois as áreas mais

claras, que correspondem às maiores altitudes, estão coincidentes. O fundo branco ou preto nas imagens foi utilizado apenas para contraste.

Tabela 3 – Relação das alturas das amostras.

Ponto	Latitude	Longitude	Cota Top (m)	Cota MDE (m)	ZMDE - ZTOP (m)
1	29°36'16.82"	53°58'29.33"	160	144	-16
2	29°35'36.77"	53°55'43.44"	140	132	-8
3	29°38'25.20"	53°55'50.41"	180	185	5
4	29°36'52.01"	53°54'41.17"	220	212	-8
5	29°39'30.28"	53°52'38.74"	120	126	6
6	29°39'53.80"	53°50'32.74"	120	125	5
7	29°34'08.72"	53°54'07.76"	160	155	-5
8	29°35'41.63"	53°52'34.03"	160	164	4
9	29°36'58.18"	53°51'09.06"	200	204	4
10	29°37'27.69"	53°46'08.57"	400	403	3
11	29°39'10.50"	53°45'31.76"	380	388	8
12	29°40'48.77"	53°41'32.41"	100	98	-2
13	29°40'20.72"	53°39'40.36"	80	79	-1
14	29°42'35.31"	53°40'08.41"	80	78	-2
15	29°41'47.47"	53°37'23.82"	80	93	13
16	29°42'49.90"	53°36'49.44"	80	85	5
17	29°44'10.01"	53°39'20.25"	80	81	1
18	29°45'03.20"	53°40'48.95"	100	93	-7
19	29°43'35.47"	53°42'28.20"	100	97	-3
20	29°42'29.96"	53°45'08.57"	120	101	-19

Para uma comparação quantitativa foram adquiridas 20 amostras em ambos os modelos digitais de elevação e, a partir disto, foram feitas as medições das alturas em cada uma delas, conforme observa-se na Tabela 3. De posse desses dados, foi aplicada a equação 1 para calcular o RMSE, obtendo-se o resultado de 7,82 metros.

De posse do valor do RMSE, realizou-se a análise de precisão, considerando que o desvio padrão amostral é igual ao erro padrão (BRASIL, 1984). Em seguida, foi calculado o valor da equidistância no MDE do SAR R-99, conforme informações apresentadas na Tabela 3, e o resultado obtido foi de 23,46 metros. Com base nesse resultado e nos critérios de classificação de cartas (BRASIL, 1984), foi definida a maior escala cuja equidistância seja imediatamente maior que a da amostra, ou seja, o MDE do SAR R-99 atingiu o PEC A na escala de 1/100.000.



Figura 9 – Correlação de 99% entre os MDE.

Considerando os valores das alturas para os dois MDE, calculou-se a correlação existente e o resultado obtido foi de 0,99, ou seja, para vinte amostras atingiu-se quase 100% de correlação entre os modelos (Figura 9).

Embora a correlação apresente um valor muito alto, isso não indica que os dois modelos como um todo estejam muito próximos, mas sim que, para esses pontos tomados, o comportamento é muito parecido, atingindo quase 100%.

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi analisar o MDE gerado pelo SAR R-99, por meio de uma comparação com o MDE gerado dos dados de uma carta topográfica, além de classificar o MDE do SAR R-99 em conformidade com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e o *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), a partir da avaliação da acurácia da altimetria.

Portanto, depois de cumpridos todos os passos para comparar os modelos e calcular o RMSE e a equidistância, concluiu-se que os dados altimétricos do MDE do SAR R-99 atendem às especificações do PEC para a classe “A” na escala de 1/100.000, considerando que as amostras foram adquiridas em locais com ausência de vegetação ou com presença de gramíneas e observando a distribuição e o espaçamento propostos pelo NSSDA. Cabe ressaltar, inclusive, que o valor da equidistância calculado com base no RMSE foi de 23,46 metros, portanto bem próximo do valor especificado pelo PEC para classe “A” na escala de 1/50.000 (20 metros).

Com o intuito de melhorar ainda mais a precisão dos dados, sugere-se que, nos próximos trabalhos, as amostras sejam adquiridas em campo, por meio de equipamentos GPS, bem como sejam colocados refletores radar em cada ponto amostral. Isso contribuiria para que as coordenadas dos pontos fossem exatas, pois seriam coletadas no próprio terreno, com o uso do GPS. Já os refletores iriam destacar a posição dos pontos na imagem SAR, permitindo sua identificação precisa. É provável que esse procedimento possibilite o valor do RMSE ficar abaixo dos 7,82 metros, o que classificaria o MDE do SAR R-99 para a classe “A” em escalas maiores.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Decreto nº 89.817**, de 20 de junho de 1984. Rio de Janeiro, 1984. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/projeto_mudanca_referencial_geodesico/legislacao/legisla_decreto_89817_d.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2013.

CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA. **Projeto Cartografia da Amazônia**: documento de referência. Brasília, DF, 2008. 63 p.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE. **National Standard for Spatial Data Accuracy**. FGDC-STD-007.3. Washington, DC, 1998. 28 p. Disponível em: <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3/>. Acesso em: 4 mar. 2013.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing**: principles and applications of imaging radar. 3. ed. New York, John Wiley & Sons, 1998. v. 2, 896 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa índice digital - mapeamento geral do Brasil**. Disponível em: <http://mapasinterativos.ibge.gov.br/sigibge/>. Acesso em: 4 mar. 2013.

LIN, Q.; VESECKY, J. F. Comparison of elevation derived from INSAR data with DEM over large relief terrain. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n. 9, p. 1775-1790, 1994.

MADSEN, S. N. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S.l.], v. 31, n. 1, p. 246-256, 1993.

MURA, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico**: sistema Geo-InSAR. 2000. 160 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000.

PINTO, M. B. P. **Entendimento e Acurácia dos Modelos Digitais de Elevação Derivados de Dados do SAR Aerotransportado do SIPAM**. 2007. 99 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SEGUNDO ESQUADRÃO DO SEXTO GRUPO DE AVIAÇÃO. **Manual do Operador do Radar de Abertura Sintética**. Anápolis, 2008. 94 p.

ZALOTI JÚNIOR, O. D. **Avaliação do Modelo Digital do Terreno extraído de dados SAR interferométricos na Banda X do SAR R-99B**. 2007. 142 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

ZEBKER, H. A. et al. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S.l.], v. 32, n. 4, p. 823-836, 1994.