

# AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DO RADAR INTERFEROMÉTRICO SAR-SIPAM

*Precision Assessment of the SAR-SIPAM Interferometric Digital Elevation Model*

**Márcio Bomfim Pereira Pinto<sup>1</sup>**  
**Paulo Roberto Meneses<sup>1</sup>**  
**Antonio Nuno de C. Santa Rosa<sup>1</sup>**  
**Nilo Sergio de Oliveira Andrade<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade de Brasília – UnB**  
**Instituto de Geociências**  
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte  
CEP: 70910-900 Brasília, DF  
E-mail: igd@unb.br

**<sup>2</sup>Comando da Aeronáutica**  
**Centro de Lançamento de Alcântara – CLA**  
Av. dos Libaneses, nº 29 – Tirirical – 65056-480 – São Luis – MA, Brasil  
dop@cla.aer.mil.br

## RESUMO

Os dados do radar imageador obtidos pela plataforma aérea R99 do Projeto SIPAM ainda esperam por validações em relação às suas precisões. Uma destas validações consiste na determinação da precisão topográfica de geração automática de RDEM (*Radar Digital Elevation Model*), obtido por técnica interferométrica na banda X. Nesse trabalho, a avaliação da precisão topográfica do RDEM foi feita por comparação com o DEM topográfico da área estudada, através de método de subtração. Identificou-se, primeiramente, que devido aos deslocamentos de trajetória da aeronave, o RDEM precisou ser ajustado por meio de correção planimétrica, resultando num erro RMS de 8,04 metros. O outro ajuste necessário foi a redução de uma componente de alta frequência nos valores dos pixels que introduzia um erro adicional, o que foi conseguido por meio de filtros gauss passa baixa. Com a filtragem, o erro RMS da precisão topográfica do RDEM variou de 4,64m a 5,61m, dependendo da distância da área imageada à antena, valor que está bem próximo do erro especificado pelo fabricante, que é de 5,0 metros.

**Palavras chaves:** Interferometria, Modelo de Elevação Digital, Radar, Precisão, R99-B SIPAM.

## ABSTRACT

The image radar data acquired using the aerial platform R99B of the SIPAM Project is still waiting for topographic accuracy assessment for final validations. One of the remaining validations is the determination of the topographic accuracy of RDEM (*Radar Digital Elevation Model*), obtained by the technique of radar interferometry in X band. In this study the evaluation of RDEM topographic accuracy was carried out by comparison between the topographic DEM of the study area, using the subtraction method. It was primarily identified that due the dislocations in the airplane baseline, it was necessary to adjust the RDEM for planimetric correction, which resulted in a RMS error of 8.04m. Another adjustment was necessary to reduce a high frequency component in the pixel values, which causes an additional error in the data. Low-pass filter eliminated the error. The RMS of the RDEM filtered data varied from 4.64m to 5.61m, depending on the distance of the area and the antenna. Those values are close to the error assures specified by the manufacturer, which is 5.0m.

Keywords: Interferometry, Digital Elevation Model, Radar, Accuracy, R99-B SIPAM

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho objetiva avaliar a precisão do modelo digital de elevação que, automaticamente, pode ser obtido das imagens interferométricas do sensor de radar aerotransportado de banda X, do projeto SIPAM. Existem diversas maneiras de se obter modelos de elevação da superfície terrestre. Os modelos topográficos tradicionais, geralmente de alto custo, vêm paulatinamente cedendo espaço aos métodos mais automatizados, como o sistema de posicionamento global –GPS, e a interferometria de radar de abertura sintética – InSAR. O interesse pelo método radar interferométrico teve início há mais de três décadas (Graham, 1974) e, em parte, contribuiu para impulsionar nos meados da década de 1990, as propostas de construção de programas de sensoriamento remoto orbital por radar, em que são exemplos JERS\_1 e RADARSAT-1. Em sensoriamento remoto, a construção de “modelos de elevação de terreno” remonta aos princípios da fotogrametria, tendo como base a diferença de paralaxe resultante da observação dos pontos do terreno a partir de dois diferentes ângulos de visada, por meio da tomada de um par estereoscópico de fotos aéreas. A mesma configuração geométrica, com a tomada de duas imagens com ângulos diferentes de visada, é a base do método interferométrico. A diferença é que o método interferométrico utiliza a diferença de fase entre os dois sinais. A posição do ponto é dada pela interseção entre as circunferências que contém a elevação de um ponto no espaço, cada uma centrada em uma antena, e o plano vertical que contém a antena e o ponto. Numa situação ideal, se não houver interferência de outros fatores, a diferença de fase pode ser utilizada para calcular a altura dos pontos do terreno. Os fatores que adicionam diferenças de fase, além da altura do ponto, são: a) se a coleta das imagens é feita ao mesmo tempo por meio de duas antenas, pode ocorrer uma diferença no retroespalhamento de um mesmo ponto nas duas imagens devido à diferença de ângulo de visada; b) se a tomada é feita em dois momentos distintos, por uma mesma antena, pode ocorrer mudança da superfície devida ao vento sobre a copa das árvores, ou chuva, ou outras alterações que tendem a aumentar as distinções tanto quanto maior for o tempo decorrido entre as tomadas.

Para medir o grau de distinção entre as duas imagens da cena, constrói-se a imagem de coerência, que consiste em uma imagem em tons de cinza cujos valores variam de zero a um. O zero, codificado em preto, significa que os pixels estão totalmente não correlacionados, e o

um, codificado em branco, denota uma correlação total entre os pixels originais.

Uma das questões básicas dos modelos de elevação produzidos por interferometria é a sua precisão. Dentre os diversos trabalhos que abordaram este problema, Madsen et al., (1993) mostraram que seria possível elaborar MDE com acurácia de 2,2m em áreas planas e de 5,0m em regiões montanhosas. Zebker et al (1994) avaliaram imagens do satélite JERS-1 para a geração de DEM e sugeriram a possibilidade de um mapeamento altimétrico global com imagens deste satélite, o que viria a ser feito em 2000 pelo ônibus espacial *Endeavour* na missão *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM. Brown et al., (2005) constataram que essas imagens tinham uma precisão de medida de altura melhor do que as especificadas pelo produto. Santos et al., (2005) também avaliaram as imagens SRTM comparando-as com levantamentos de pontos GPS e com um modelo gerado a partir de cartas topográficas da região amazônica, verificando que o primeiro fornecia produtos de qualidade cartográfica Categoria A, o que não ocorria com o último. As mesmas conclusões foram também obtidas por Pinheiro (2006) por comparações de DEM SRTM com cartas topográficas e medidas GPS em áreas de relevo escarpado. Estes trabalhos são comprovações de que a interferometria SAR não é somente uma curiosidade de interesse científico, mas é uma alternativa viável às técnicas convencionais fotogramétricas para gerar mapas topográficos de alta precisão. Além desta finalidade, os métodos interferométricos são úteis na detecção de pequenos movimentos da Terra causados por terremotos e atividades vulcânicas.

## 2. ÁREA TESTE

A área teste de estudo situa-se numa porção da Reserva Ecológica do IBGE, no Distrito Federal, onde se dispõe de um levantamento topográfico convencional na escala 1:10.000, com equidistância de curvas de nível de 2 metros. A área tem uma extensão de 11 km por 10 km e possui um relevo com uma variação topográfica de suave a ondulado. Na porção sul da área o relevo é suavemente ondulado e ao norte é dissecado pela pequena microbacia do córrego Taquara. As altitudes das cotas topográficas variam de 1000 a 1200 metros. A cobertura vegetal é do bioma Cerrado, com formações de matas de galerias e savânicas de cerrado *sensu strictu* e campos cerrados limpo e sujo, que não configuram dosséis elevados que possam interferir nas medições SAR altimétricas do terreno. Na

figura 1 a área teste é mostrada pelo retângulo mais claro no centro e lateralmente completada por imagem *geocover* para fins de referência. As manchas negras que a imagem apresenta são locais onde as informações de retroespalhamento do radar não existem, tais como zonas de sombra, corpos de água ou solos agricultados de textura lisa.

A imagem SAR, no centro da figura 1, foi obtida com a aeronave R99 do projeto SIPAM, que está equipada com três sensores imageadores: sensor óptico e infravermelho (OIS); imageador multiespectral (MSS) e radar de abertura sintética (SAR). O SAR pode operar, simultaneamente, nas bandas L e X, ambas com resoluções espaciais de 3 m, 6 m ou 18 m. A banda L foi operada no modo com multipolarização *QUAD L* (HH, HV, VV e VH) e a banda X foi operada no modo *INSAR* interferométrico com polarização HH, realizado por duas antenas sob uma base fixa. Para as resoluções mencionadas o imageamento é feito, respectivamente, com malhas de amostragem (distância entre pixels) de 2,5 m, 5 m e 15 m, que multiplicados pelo total de 8000 *range gates*, geram faixas com larguras de 20 km, 40 km e 110 km. A imagem interferométrica analisada nesse estudo foi obtida com os seguintes parâmetros:

- resolução espacial de 3m
- pixel spacing de 5m
- distância mínima início de imageamento - 14km
- distância máxima do início de imageamento de 25km
- largura da faixa imageada (km / pixels) 10 / 4.000
- limite - distância máxima 24 – 35km
- altura de voo de 9631m
- ângulo de incidência - *near range* 40° 23' - *far range* 72° 22'.

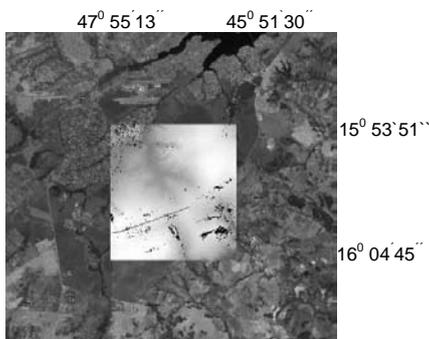


Fig.1 – Área teste posicionada na região central da figura com imagem de fundo *geocover*.

### 3. MÉTODO INTERFEROMÉTRICO

Os princípios básicos da teoria de radar interferométrico foram bastante discutidos por

Graham (1974), Zebker et al., (1991), Zebker e Goldstein (1986), Massonet e Rabaute (1993) e Madsen et al., (1993). Nesta sessão são descritas as etapas de processamento que são necessárias para a obtenção de RDEM com o método *InSAR* (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

### 3.1 Processamento InSAR

A interferometria SAR consiste na obtenção de valores complexos que são registrados para se obter a amplitude e principalmente a fase que está relacionada à posição do ponto no espaço. O sistema gera duas imagens simultâneas da mesma cena, uma por cada antena da aeronave, com uma pequena diferença de ângulo de visada, sendo cada valor do pixel das imagens representado por um número complexo que contém a parte real do sinal e a parte imaginária. A figura 2 mostra esquematicamente a geometria do módulo interferométrico. A diferença de fase  $\Delta\phi$  é dada pela equação 1 em função da diferença dos percursos  $R_1$  e  $R_2$ . Sendo um espalhamento geométrico, têm-se as distâncias em coordenadas esféricas e em comprimento de onda. Por sua vez,  $R_1$  e  $R_2$  podem ser obtidos em função da altura relativa e da posição da aeronave em relação à posição do alvo por meio de relações de triângulo retângulo, o que resulta nas equações 2 e 3. A altura relativa da aeronave é dada por  $\Delta H = H_1 - h$

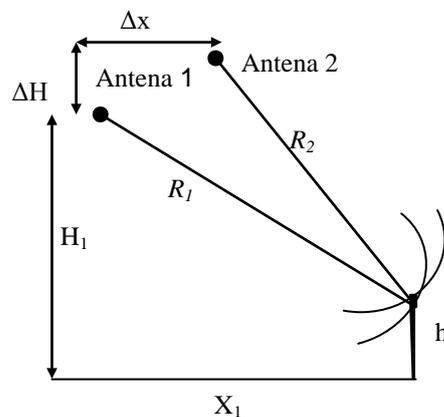


Fig. 2 – Geometria do modo *INSAR*. Modificado de MacDonald Dettwiler Module 3e: *Interferometric SAR* (2000).

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) \quad (1)$$

$$R_1 = \sqrt{x_1^2 + (H_1 - h)^2} \quad (2)$$

$$R_2 = \sqrt{(x_1 - \Delta x)^2 + (H_1 + \Delta H - h)^2} \quad (3)$$

Na prática podem ocorrer diferenças de fases além das devidas às distâncias  $R_1$  e  $R_2$ , por exemplo, por uma diferença no retroespalhamento de um mesmo ponto nas duas imagens devido à diferença de ângulo de visada. Para medir o grau de distinção entre as duas imagens tomadas da cena, constrói-se a imagem de coerência, que consiste em uma imagem em tons de cinza, cujos valores estão entre 0 e  $2\pi$  rad., quantizados para 8 bits e depois re-escalados entre os valores 0 e 1. O zero, codificado em preto, significa que os pixels estão totalmente não correlacionados, e o um, codificado em branco, denota uma correlação total entre os pixels originais. Quanto maior o grau de correlação entre os pixels, maior será a parcela de diferença de fase que resulta da diferença de distância, ou seja, maior será a precisão do processo de medição da geometria do alvo em função da diferença de fase.

### 3.2 Compensação das Irregularidades na Trajetória da Aeronave

A trajetória descrita pela plataforma em um sistema radar aerotransportado é perturbada por diversos fatores, especialmente o vento. Os sistemas possuem piloto automático que minimiza desvios, mas que permanece como um fator a ser considerado. A posição da aeronave é normalmente determinada por três sistemas de navegação 1) um sistema digital de dados aeronáuticos que inclui um sistema inercial de navegação, um altímetro barométrico e um altímetro Radar; 2) um sistema GPS; 3) um sistema Radar de navegação inercial. Estes três sistemas combinados permitem obter um posicionamento preciso da aeronave (Andrade, 1999).

Os desvios da aeronave em relação a uma trajetória reta ideal reduzem a acurácia do posicionamento dos pixels da imagem. Costumam ser bastante severos os erros de altitude nos modelos digitais de elevação devido ao rolamento da aeronave. O primeiro passo do processo de compensação de movimentos é a determinação da posição de ambas as antenas no momento de emissão de cada pulso do radar, como exemplifica a figura 3.

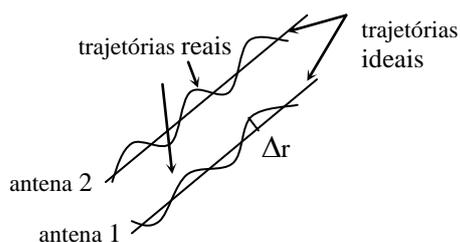


Fig. 3 – Geometria da compensação de irregularidades do movimento da plataforma

A fase de onda de cada pixel deve ser então corrigida pela equação 4.

$$\Phi_{mc} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4)$$

sendo  $\Phi_{mc}$  a diferença de fase provocada pela diferença de posicionamento  $\Delta r$

Como já comentado, há vários trabalhos que avaliaram a precisão de DEM gerados por plataformas orbitais, como o SRTM. Entretanto, o caso das plataformas aerotransportadas é pouco estudado, mas algumas metodologias, como as de Madsen et al., (1993) e Câmara & Scheiber (2005), foram desenvolvidas para realizar as correções de trajetórias.

### 3.3 Geração do Interferograma

O passo seguinte é a produção do interferograma que consiste em combinar as informações de fases das imagens SLC (*single look complex*) obtidas anteriormente, de modo a obter-se uma “imagem” da diferença de fase. Esta diferença é obtida multiplicando pixel a pixel o número complexo de uma imagem pelo complexo conjugado do pixel correspondente da outra. A figura 4 é um exemplo que mostra uma imagem obtida da diferença de fase das duas imagens anteriores, codificadas em níveis de cinza que representam a diferença de fase entre 0 e  $2\pi$ .

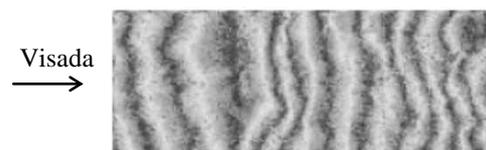


Fig. 4 – Primeira fase na obtenção do interferograma. Fonte: Nievinski & Sousa (2005).

### 3.4 Eliminação do Efeito “Terra Plana”

A diferença de fase entre as duas imagens é em parte devida à distância na horizontal. No entanto, só interessa para a geração do Modelo Digital de Elevação a parte da diferença de fase devida à altura do ponto. Portanto, a componente devida à chamada “terra plana” deve ser subtraída. Se a superfície imageada fosse plana, o interferograma produzido seria semelhante ao da figura 5b. Uma vez retirado o efeito terra plana, o interferograma seria semelhante ao da figura 5c, na qual a fase ainda está incompleta, pois varia apenas entre a 0 a  $2\pi$  rad.

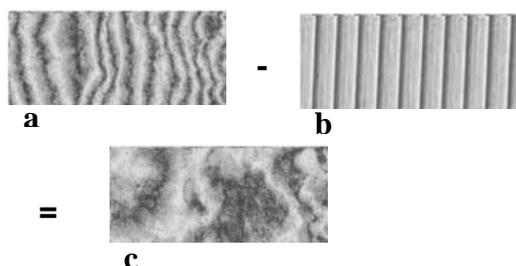


Fig. 5 – Subtração da componente de fase devido à superfície plana. a) primeira fase; b) fase devida à terra plana; c) interferometria livre da terra plana. Fonte: Nievinski & Sousa (2005).

### 3.5 Avaliação da Coerência

Coerência é a medida de quanto a diferença de fase é devida à mudança das distâncias em relação à fonte emissora do sinal, ou seja, a taxa de variação do terreno imageado. Uma coerência alta significa que a diferença de fase é devida à diferença de altura do ponto; coerência baixa indica que a diferença de fase pode ser devida a outros fatores. Outros fatores além da distância podem provocar diferenças de fase, tais como o vento na copas das árvores, diferenças de umidade ou simplesmente a diferença de ângulo de visada entre uma antena e outra. Esta medida é muito importante quando as imagens são tomadas em instantes diferentes, como é o caso de imagens obtidas por satélites. Queimadas, ações antrópicas ou mesmo uma chuva podem reduzir a coerência a ponto de tornar os pixels inviáveis para determinação da altitude. No caso das imagens obtidas pelo R99, espera-se que os valores de coerência sejam muito altos, pois as imagens foram tomadas simultaneamente.

A magnitude da coerência é a medida do desvio padrão da estimativa interferométrica da fase. Se a magnitude da coerência for igual a 1 significa que a estimativa de fase é perfeita. Se a magnitude for igual a zero significa que a estimativa de fase é puro ruído. Para serem utilizáveis na estimativa da altura dos pontos, as informações da interferometria devem possuir uma coerência acima de 0,3 (relação sinal/ruído maior que 1).

### 3.6 Desdobramento de Fase (*phase unwrapping*)

Uma etapa crucial na determinação da altura por interferometria é o desdobramento de fase, que consiste em recompor a diferença de

fase completa do sinal a partir de amostras em módulos  $2\pi$ , ou seja, com amplitude de 0 a  $2\pi$  rad. Quando é feita a operação para obter o interferograma, o resultado é sempre um valor entre 0 e  $2\pi$ . Ocorre que esta diferença pode embutir  $n$  ciclos da onda do radar. O desdobramento de fase tem por objetivo determinar a diferença completa da fase, incluindo os  $n$  ciclos que decorreram entre a chegada do sinal a uma e outra antena. O processo de desdobramento de fase é bastante complexo e crítico para o sucesso da produção do DEM. Diversos métodos foram desenvolvidos, como os apresentados por Xu & Cumming (1999), Constantini et al., (1999) e Chen & Zebker (2002). Em Dutra (2003) pode-se ver os resultados de desdobramento de fase (figura 6). Observe que a fase desdobrada codificada em tons de cinza já sugere o relevo da cena, embora ainda não seja o relevo.

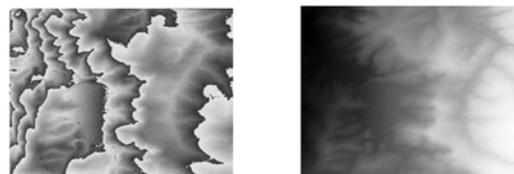


Fig. 6 – Desdobramento de fase. Fonte: Dutra (2003)

### 3.7 Geoposicionamento das Amostras

Os pixels ou amostras resultantes do desdobramento de fase não possuem a mesma relação geométrica das imagens iniciais, pois estas amostras devem ser localizadas no espaço tridimensional, ao invés do plano horizontal como é o caso das imagens iniciais. Para se determinar a posição do pixel no espaço é necessário montar um sistema de três equações para calcular os valores das três incógnitas correspondentes às três coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do alvo. Resolvendo-se o sistema, obtém-se uma grade irregular de pontos posicionados no espaço (figura 7).



Fig. 7 – Geoposicionamento das amostras

### 3.8 Reamostragem para uma Malha Regular

Para a obtenção do RDEM a malha de amostras da figura 7 precisa ser reamostrada de modo a obter por meio de interpolação uma nova malha com pixels uniformemente distribuídos no plano. Em seguida esta malha uniforme é transformada no modelo RDEM, visto na figura 8.



Fig. 8 – RDEM da área de estudo que inclui a microbacia do córrego Taquara.

### 4. AVALIAÇÃO DO RDEM GERADO

O RDEM gerado pelo método interferométrico aerotransportado foi avaliado por meio de uma comparação com o DEM obtido por topografia convencional feito pelo IBGE, na escala 1:10.000, com distância de curva de nível de 2 metros, georreferenciado no datum original SAD69 e vértice Imbituba/SC. Os dados foram fornecidos pelo IBGE já convertidos para coordenadas geodésicas, com datum planimétrico WGS84. Para permitir uma comparação pixel a pixel do RDEM com a topografia, as curvas de nível foram interpoladas para o formato *raster*, com as mesmas características do RDEM, ou seja, com pixel de 5 metros e ambos foram recortados precisamente nas mesmas coordenadas.

Porque o RDEM possui alturas elipsoidais, enquanto a topografia possui alturas ortométricas, é preciso subtrair a ondulação geoidal. Para isso, a área de estudo foi dividida em células de quinze segundos. Para cada célula foi calculada a ondulação geoidal por intermédio do programa MapGeo disponível no sítio eletrônico do IBGE. A média da ondulação obtida foi -12,7 m, sendo que a diferença entre o maior e o menor valor foi de apenas 0,08 m. Este erro, comparado com os erros na topografia (menor que 0,50 m), é desprezível. Portanto, foi utilizada apenas a média da ondulação geoidal  $N_g$ . A equação 5 mede a diferença  $D$  entre as

alturas estimadas pelo RDEM e pelo levantamento topográfico.

$$D = (\text{RDEM} - N_g) - \text{Topografia} \quad (5)$$

Esta equação foi executada pixel a pixel e, assim, gerou-se a imagem diferença mostrada na figura 9. Ela está codificada em tons de cinza, de modo que o tom de cinza médio das bordas representa o valor zero. Valores maiores que zero estão representados em tons mais claros, e valores negativos em tons mais escuros. O erro RMS calculado pixel a pixel foi de 10,27 m. Uma característica que foi observada nesta imagem foram as variações bruscas na diferença em subáreas da microbacia, indicando que havia uma superestimação das alturas pelo RDEM. A região branca no lado direito da imagem é uma saturação de sinal local. Uma possível maneira de se corrigir este defeito seria uma reamostragem com valores próximos a esta região, o que corresponderia a valores sintéticos na imagem. Não se fez essa correção em função de que não alteraria o valor das curvas de nível dos dados observados.

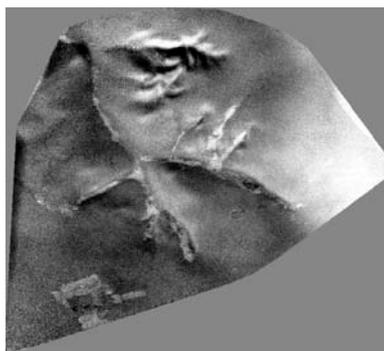


Fig. 9- Diferença entre o RDEM e o modelo topográfico.

Comparando-se a posição dos fundos de vales constatou-se que este problema foi causado por um deslocamento de cerca de 150m para sul e 25m para oeste do RDEM, em relação ao levantamento topográfico, devido ao deslocamento da trajetória da aeronave. Estes deslocamentos são erros não sistemáticos ocorridos na fase de obtenção aérea dos dados e que acarretam uma degradação na qualidade do dado altimétrico. A correção desse deslocamento foi feita georreferenciando-se o RDEM a partir de pontos de controle obtidos de uma drenagem visualizada numa imagem *geocover* da área, já georreferenciada. Após o georreferenciamento o erro RMS caiu para 8,04 metros. Portanto, ficou ainda bem acima dos 5,0 metros de limite de precisão especificado pelo fabricante, que é o valor calculado para uma faixa imageada no terreno de 3km de largura e

posicionada a uma distância mediana da aeronave. A imagem diferença com o RDEM ajustado é mostrada na figura 10.

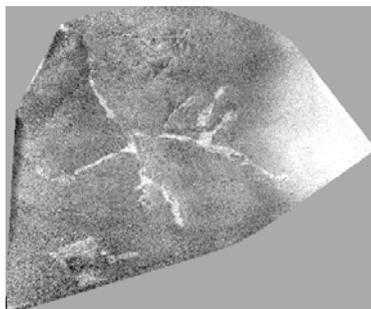


Fig. 10 – Diferença com o RDEM ajustado ao modelo topográfico

Na tentativa de melhorar o erro RMS, foi feita uma análise da frequência dos sinais do RDEM, através de um perfil topográfico de uma pequena porção do RDEM. Constatou-se que havia uma componente de alta frequência nos valores dos pixels que introduzia um erro adicional, o qual pôde ser reduzido por filtragem gauss passa baixa para reduzir as altas frequências. Os melhores resultados foram obtidos com os filtros de convolução Kernel de tamanho 15x15. Com esta diferença o erro RMS da imagem diferença de toda a área ficou em 6,50 m.

No RDEM da figura 10 a faixa de área á direita (*near range*), com largura de 2,2 km e que está na porção mais próxima do sensor, foi a que apresentou os maiores erros RMS na altimetria do RDEM, e não se presta para uso. Não há na imagem de coerência nenhum sinal de que estas imprecisões sejam devidas à baixa correlação das imagens nesta área. Pode ser que estes erros sejam devidos ao baixo ângulo de incidência, a partir de  $36^{\circ}34'$ , mas não se tem certeza disso.

Vários trabalhos de avaliação de modelos digitais de elevação interferométrica reportam que a técnica apresenta uma acurácia maior em áreas de relevo plano do que em áreas de relevo ondulado. Para avaliar isto foram extraídos os valores RMS do RDEM de três faixas de 3km de largura cada uma, posicionadas no *near range*, na parte central da área e no *far range*. Da faixa central e do *far range* foram também selecionados pequenos segmentos de áreas com relevos planos e com relevos ondulados, e medidos os valores RMS do RDEM. A largura de 3 km das faixas deve-se à afirmação do fabricante que assegura uma acurácia melhor que 5 m para uma faixa desta largura. Foram então feitas as imagens diferenças com as áreas correspondentes do

modelo topográfico e calculado o erro RMS para as áreas da faixa central e da faixa mais distante (*far range*). A tabela 1 resume os resultados destas comparações em três condições: 1) tal como o RDEM é automaticamente gerado e fornecido pelo SIPAM; 2) com o ajuste planimétrico (georreferenciamento) e 3) com ajuste planimétrico e filtragem gauss passa-baixa 15x15.

O RDEM ajustado mostra sempre resultados melhores para todas as áreas. Confirmou-se também, que as áreas de relevo mais movimentado, tal como reportado na literatura, apresentam erros maiores que as áreas de relevo plano. A faixa que apresentou os melhores resultados foi a da porção central da área, com erro de 4,64 m numa região de ângulos intermediários de incidência.

TABELA 1. RESUMO DOS ERROS RMS EM TRÊS DIFERENTES ÁREAS DO RDEM

Áreas	RMS (metro)		
	SIPA M	Após ajuste planimétrico	Após ajuste planimétrico e filtro
Faixa no <i>near range</i>	15,00	12,71	12,69
Faixa central	8,66	6,16	4,64
Faixa no <i>far range</i>	10,11	7,71	5,61
Segmentos de área ondulada da faixa central	17,96	6,44	4,38
Segmentos de área plana da faixa central	6,08	4,58	2,79
Segmentos de área ondulada no <i>far range</i>	6,23	7,73	5,70
Segmentos de área plana no <i>far range</i>	6,51	5,31	1,90

Por último, foi verificada a qualidade do RDEM para gerar curvas de nível, comparando-as, qualitativamente, com as curvas de nível do levantamento topográfico do IBGE. Utilizando os parâmetros estabelecidos pelas normas do Decreto nº 89.917 que define o Padrão de Exatidão Cartográfica, com a acurácia altimétrica de 8,66 m na faixa central indicada pelo fabricante, o modelo SIPAM permitiria a geração de produtos cartográficos em Classe A na escala 1:100.000. Quando se considera o modelo após os ajustes planimétrico e de filtragem do sinal, a acurácia de 4,64m permitiria a produção cartográfica em Classe A na escala 1:50.000 e em Classe C na escala 1:25.000.

A figura 11 é o detalhe de um vale situado na porção norte da imagem. As curvas de nível em traço contínuo são as curvas mestres da topografia e, as tracejadas, derivadas do RDEM, com equidistância de 10 m. Visualmente pode-se observar uma razoável concordância das curvas de nível com as derivadas do RDEM, o que estaria compatível com o erro RMS calculado.

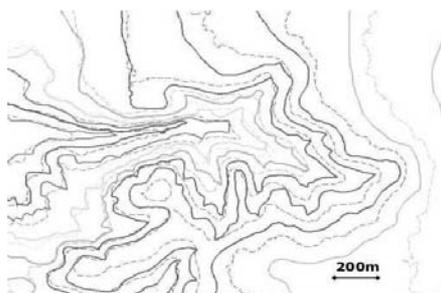


Fig. 11 – Em tracejado curvas de nível geradas com o RDEM após filtragem gauss passa-baixa, e linhas contínuas geradas pelo modelo topográfico.

## CONCLUSÕES

Verificou-se que a imprecisão altimétrica do RDEM interferométrico gerado automaticamente, deveu-se primeiramente a erros de trajetória de voo, em cerca de 150 m para sul e 25 m para oeste. O ajuste planimétrico efetuado por georreferenciamento aumentou a acurácia para 6,16 m, o que permite a produção cartográfica em classe A, com curvas de nível de 25 metros de equidistância. A fim de melhorar o erro RMS, foi feita uma análise da frequência dos sinais através de um perfil topográfico do RDEM e constatou-se que havia uma componente de alta frequência nos valores dos pixels que introduzia um erro adicional, o qual pôde ser reduzido com filtros gauss. O erro RMS da imagem diferença ficou em 6,50 m, e na faixa de imageamento mais central, onde o fabricante garante precisão de 5,0 m, a precisão foi de 4,64 m. O desempenho do modelo é melhor para áreas planas do que para áreas de relevo movimentado. Embora o fabricante garanta que, da faixa imageada de 10 km de largura, apenas uma faixa de 3km terá uma precisão de 5,0 m, verificou-se que uma faixa adicional de 3 km na posição em *far range* apresenta erros muito semelhantes àquela e pode ser utilizada, desde que a exatidão requerida o permita. Sugere-se para trabalhos futuros testes com áreas de maior dimensão,

para melhor precisar a segurança dos dados em relação à largura da faixa imageada, bem como testes em área de relevo ondulado e montanhoso, ou com densa cobertura vegetal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, N.S.O. **Qualidade geométrica de imagens JERS-1 (SAR) e RADARSAT (modos S2 e S3) em ambiente de floresta tropical (Rondônia)** São José dos Campos: 203p. INPE, 1999.

BROWN, C.G.; SARBANDI, Jr.K.; PIERCE, L.E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data, **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, vol..43 No. 8 p.1707-1715, Aug. 2005

CAMARA de M.K.A.; SCHEIBER,. Precise Topography and aperture dependent motion compensation for airborne SAR. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, vol..2 No. 2 p.172-176, Apr. 2005

CHEN, C.; ZEBKER, H.A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized Network Models. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, vol..40 No.8 p.1709-1719, Aug. 2002

COSTANTINI, M., FARINA, A.; ZIRILLI, F. A fast phase unwrapping algorithm for SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, vol..37 No. 1 p.452-60, Jan. 1999

DUTRA, L.V. Processamento de imagens de radar de abertura sintética: princípios e aplicações. In: IV Workshop em Tratamento de Imagens, Junho 2003. NPDI/DCC/ICEx/UFMG. **Anais** p. 4-13. Junho 2003

GRAHAM, L.C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **In Proc. IEEE**, vol.62, p. 763-768, 1974.

MACDONALD DETTWILER. **Module 3e: Interferometric SAR**. Richmond, Canada. 2000.

MADSEN, S.N.; ZEBKER, H. A.; MARTIN, J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**. vol 31:1 p.246-255, 1993.

MASSONET, D.; RABAUTE, T. Radar interferometry: limits and potential. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, vol 31:2 p.455-464, 1993.

NIEVINSKI, F.G.; SOUZA, S.F. Demonstração de processamento interferométrico de imagens de Radar de abertura sintética, utilizando programas e dados disponíveis gratuitamente. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Abr. 2005. **Anais** p. 4429-4436.

PINHEIRO, E.S. Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, cartas topográfica e GPS: numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, No. 58/01, 9p, 2006

SANTOS, P.R.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L.C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Abr. 2005. **Anais** p.4473-4480, 2005

XU, W.; CUMMING, I.; A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, vol..37 No. 1 p.124-1134, Jan. 1999

ZEBKER, H. A., GOLDSTEIN, R.M. **Topographic mapping form interferometric SAR observations**. J. Geophysics. Res., vol.91, 1986

ZEBKER, H. A.; MADSEN, S.N.; MARTIN, J.; WHEELER, K.B.; MILLER, T.; YULING, L.; ALBERTI, G.; VETRELLA, S.; CUCCI, A. The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**. vol 30 p.933-940, Sept.1991.