

Revista Brasileira de Cartografia (2013) N^o 65/4: 617-632
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE EXTRAÍDOS DE IMAGENS PRISM/ALOS: ABORDAGEM RPC

*Analysis of Digital Surface Models Extracted from PRISM/ALOS Images: RPC
Approach*

**Leila Freitas de Oliveira¹, Nilcilene da Graças Medeiros²
& Mauricio Galo³**

¹Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Diretoria de Geociências – Coordenação de Cartografia

Av. Brasil, 15.671, Parada de Lucas – CEP: 21.241-051 – Rio de Janeiro/RJ

leila.oliveira@ibge.gov.br

²Universidade Federal de Viçosa – UFV

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas – Departamento de Engenharia Civil

Campus Universitário – CEP:36.570-000 – Viçosa/MG

nilcilene.medeiros@ufv.br

³Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen 305, CEP: 19.060-900, Presidente Prudente/SP

galo@fct.unesp.br

Recebido em 29 de setembro, 2011/ Aceito em 23 de janeiro, 2012

Received on September 29, 2011/ Accepted on January 23, 2012

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a análise da qualidade altimétrica de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) gerados a partir de pares estereoscópicos de imagens PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) do sensor ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), considerando-se a abordagem de correção geométrica segundo o modelo generalizado com uso de Coeficientes Polinomiais Racionais (RPCs). Na geração dos produtos e nas análises são consideradas diferentes estratégias de correlação de imagens, espaçamento da grade e acurácia altimétrica dos MDSs, avaliada de forma global e local. Os pontos de controle usados na correção geométrica, bem como para a avaliação global da acurácia altimétrica dos MDSs, foram determinados por posicionamento GPS relativo estático. As avaliações locais, visando análise do comportamento dos MDSs, segundo diferentes morfologias, foram realizadas a partir de pontos de controle determinados por posicionamento GPS relativo cinemático, em superfícies de baixa declividade e em áreas de encostas. Os resultados alcançados em nível global sinalizaram que os fatores: uso de pontos de controle para refinamento do RPCs, estratégias de correlação e espaçamento da grade influenciaram a acurácia altimétrica dos MDSs, relativamente ao padrão de acurácia esperado (1:25.000, classe A). Quanto à avaliação em nível local, os resultados indicaram que diferentes morfologias influenciaram a acurácia do MDS relativamente à análise global. De forma geral, áreas com menor declividade apresentaram resultados mais acurados. Neste estudo de caso, como evidenciado

em outras pesquisas, percebeu-se que houve a degradação da acurácia altimétrica em algumas regiões de maior declividade.

Palavras chaves: Modelo Digital de Superfície, Coeficientes Polinomiais Racionais, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The purpose of this paper is the vertical quality assessment of Digital Surface Models (DSMs) generated from stereo pairs of PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) images, acquired from ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) considering the approach of generalized model using Rational Polynomial Coefficients (RPCs). The MDSs generation and the analysis include different image matching strategies, grid distance and DSMs vertical accuracy, assessed globally and locally. The ground control points used in geometric correction and in global assessment of the vertical accuracy of DSMs, were determined by GPS relative static positioning. The local assessments, aiming the analysis of DSMs for two different morphologies, were performed from control points determined by relative kinematic GPS positioning in low-slope surfaces and on inclined surfaces. The global results achieved indicated that the RPCs refinement with ground control points, as well as the strategies for image matching and grid distance influenced the vertical accuracy of the DSM, in relation to the expected accuracy standard (1:25.000, class A). For the local assessment, the results indicated that different morphologies influenced the accuracy of the DSM, in relation to global assessment. In general, low-slope areas presented more accurate results. In this case study, as evidenced in other studies, there was a general degradation of the altimetric accuracy in some regions of higher slope.

Keywords: Digital Surface Model, Rational Polynomial Coefficients, Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de imagens orbitais para obtenção de dados altimétricos vem ganhando importância desde o final dos anos 90, na medida em que passaram a ser oferecidas melhores resoluções espaciais, melhor qualidade na geometria de aquisição e melhores condições para obtenção de pares estereoscópicos (LI e GRUEN, 2004).

As imagens orbitais brutas apresentam distorções geométricas significativas que impedem sua utilização direta como base de referência para aplicações em Cartografia e áreas correlatas. Diante deste fato, a correção geométrica das imagens constitui uma etapa determinante para a geração de dados com a qualidade espacial, incluindo a geração de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) e Modelos Digitais de Terreno (MDTs).

De acordo com Cheng e Toutin (2001), modelos rigorosos refletem a realidade física da geometria da visada e corrigem as distorções inerentes à plataforma, ao sensor e à Terra. Assim, pressupõe-se que sejam conhecidos os parâmetros físicos relacionados ao sensor e à plataforma do satélite (atitude e efemérides) nos instantes de aquisição das imagens, que nem sempre são disponibilizados aos usuários. Ao invés disso, os provedores fornecem os coeficientes de polinômios racionais (*Rational Polynomial Coefficients* – RPCs) determinados a partir dos dados orbitais (TOMMASELLI e MEDEIROS, 2010).

Os RPCs são coeficientes utilizados no modelo matemático baseado em funções racionais (*Rational Functions Model* – RFM), que associa coordenadas X, Y, Z de pontos no espaço objeto às coordenadas (linha e coluna) de cada *pixel* na imagem, ou vice-versa, a exemplo dos modelos físicos do sensor, mas na forma de funções racionais expressas por razões de polinômios (HU *et al.*, 2004).

A extração automática de MDTs e MDSs a partir de pares estereoscópicos corrigidos de distorções geométricas ocorre segundo três etapas principais (LI *et al.*, 2005), quais sejam: a correspondência das imagens para obtenção de pontos homólogos do par estéreo; a reconstrução da superfície para interpolação de valores de altitude; e o pós-processamento visando edição e controle de qualidade do modelo.

Neste trabalho foi dado enfoque à geração de modelos digitais para representação da topografia a partir de imagens ópticas *triplet* (tripleto) do sensor PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), carregado a bordo da plataforma orbital ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), fabricada pela Agência Espacial Japonesa JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*). A configuração denominada *triplet* representa um conjunto de três imagens adquiridas ao longo da órbita do satélite, segundo três visadas distintas, permitindo a geração

de um modelo estereoscópico a partir destas imagens. O modelo matemático de correção geométrica adotado foi o modelo RFM, uma vez que os RPCs correspondentes às cenas utilizadas eram conhecidos.

Vale salientar que para a geração dos modelos 3D foram consideradas diferentes abordagens, no sentido de avaliar a influência de certos fatores em sua qualidade final, como a combinação de visadas, estratégias de correlação das imagens e espaçamento da grade dos MDSs.

2. MODELO BASEADO EM FUNÇÕES RACIONAIS

A origem dos modelos baseados em funções racionais ou RFM (*Rational Function Model*) está justamente na razão entre polinômios, ou seja:

$$r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} \quad c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} \quad (1)$$

no qual:

(r_n, c_n) : são coordenadas no espaço imagem (linhas, colunas) normalizadas;

(X_n, Y_n, Z_n) : são coordenadas normalizadas no espaço objeto; e

p_i , com $i=\{1, 2, 3, 4\}$: são polinômios do modelo.

Considerando um dos polinômios da Equação 1, o polinômio p_1 , por exemplo, pode ser escrito de forma genérica por:

$$p_1 = \sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k, \quad (2)$$

no qual a_{ijk} são os coeficientes racionais deste polinômio. Deste modo, assumindo que os demais polinômios p_2, p_3 e p_4 sejam escritos em função dos respectivos coeficientes b_{ijk}, c_{ijk} e d_{ijk} , o conjunto destes coeficientes são denominados RPCs. Tais coeficientes podem ser calculados segundo duas abordagens: a partir de pontos de controle determinados no terreno ou fornecidos pelos provedores de imagens de satélite.

Os RPCs fornecidos pelos provedores de imagens são calculados a partir do modelo físico 3D do sensor, onde os parâmetros de orientação da imagem derivam de dados de efemérides e atitude do satélite, sem uso de pontos de controle medidos no terreno (HU *et al.*, 2004, TOUTIN, 2004; TAKAKU e TADONO, 2009).

Na abordagem que utiliza o modelo físico 3D do sensor, o modelo RFM, expresso pela Equação 1, estabelece uma relação entre uma grade bidimensional representando o espaço imagem, e uma grade tridimensional para representar o espaço objeto em planos horizontais (normalmente de 3 a 5), com diferentes elevações, conforme apresentado na Figura 1. As coordenadas horizontais (latitude e longitude) de um ponto na grade 3D são calculadas a partir do ponto (linha, coluna) correspondente na grade que representa a imagem, usando o modelo físico 3D do sensor, para cada elevação. Dessa forma, os parâmetros de orientação da imagem derivam dos dados de efemérides e atitude do satélite. Os coeficientes das funções racionais são então estimados através de ajustamento dos dados pelo método dos mínimos quadrados (GRODECKI, 2001; FRASER *et al.*, 2006).

Dependendo do sensor utilizado, o modelo baseado na razão de polinômios pode admitir diferentes ordens. No caso do sensor PRISM/ALOS são considerados polinômios de terceira ordem, correspondendo a 20 (vinte) coeficientes por polinômio, totalizando 80 (oitenta) coeficientes por imagem.

Essa abordagem de modelagem baseada em funções racionais foi primeiramente empregada pela empresa *Space Imaging* para as imagens Ikonos, tendo sido adotada como padrão na indústria (XU, 2004). Os RPCs são fornecidos juntamente com as imagens, e estão disponíveis para imagens de alta resolução espacial, como Ikonos e GeoEye, pela empresa *Space Imaging*; Quickbird e WorldView,

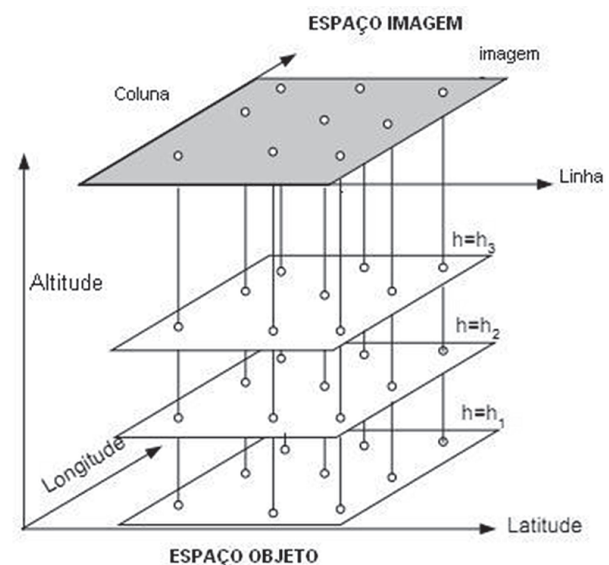


Fig.1 - Representação esquemática da geração dos RPCs.

pela empresa *Digital Globe*; e PRISM, pela RESTEC. Atualmente, os principais *softwares* de processamento fotogramétrico suportam a utilização dos RPCs fornecidos pelos provedores de imagens.

Mais detalhes sobre o modelo RFM podem ser obtidos em Grodecki (2001), Toutin (2004), Hu et al (2004), Xu (2004), e Dial e Grodecki (2005).

3. SENSOR PRISM/ALOS

O PRISM é um sensor óptico que operou a bordo do Satélite ALOS, de 24/01/2006 a 12/05/2011. Atualmente podem ser adquiridas apenas imagens de acervo. O sensor apresenta uma banda pancromática nos comprimentos de ondas entre 0,52 e 0,77 μm ; sua resolução radiométrica é de 8 (oito) bits e a resolução espacial de 2,5 m no nadir. Este sensor, do tipo *pushbroom*, compreende 3 (três) sistemas de imageamento, com dispositivos ópticos independentes, que permitiram obter simultaneamente cenas com visadas no nadir, inclinada para frente (*forward*) e inclinada para trás (*backward*), tornando possível a aquisição de imagens estereoscópicas ao longo da trajetória (IBGE, 2009).

O sensor PRISM é formado por 6 (seis) unidades de CCD na visada nadir e 8 (oito) unidades nas visadas *backward* e *forward* (Figura 2). Cada CCD da visada nadir é formado por 4.992 *pixels*, enquanto que os CCDs das visadas *backward* e *forward* são formados por 4.928 *pixels* (EORC e JAXA, 2007).

O sensor operou em diferentes modos de observação por combinação de visadas. No modo de observação nadir o usuário recebe apenas a imagem correspondente a essa visada, gerada a partir de 6 (seis) CCDs recobrimo uma faixa de 70 km de largura. No modo de *triplet* de observação (nadir + *backward* + *forward*) são considerados, no máximo, 4 (quatro) CCDs por visada, imageando

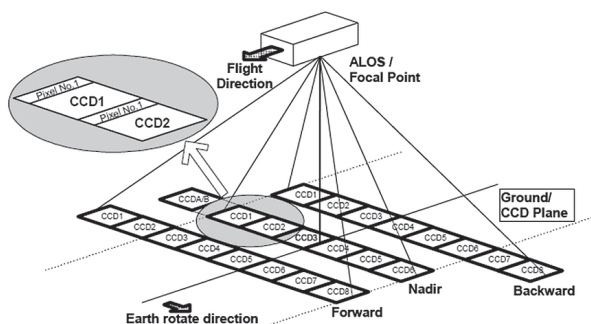


Fig.2 - Configuração das unidades de CCDs do sensor PRISM.

simultaneamente uma faixa de 35 km de largura (EORC e JAXA, 2007).

3.1 Níveis de processamento

As imagens dos sensores PRISM podem ser adquiridas em 3 níveis de processamento diferentes: 1A, 1B1, 1B2 (R e G). O produto 1A corresponde à imagem bruta (sinal digital convertido em imagem); o produto 1B1 apresenta correção radiométrica e inclui os dados precisos de órbita e atitude necessários à correção geométrica pelo modelo rigoroso. O produto 1B2R apresenta correção geométrica associada, baseada em dados de efemérides, e a imagem apresenta seus *pixels* orientados no sentido da trajetória do satélite. O produto 1B2G corresponde à imagem 1B2R rotacionada, de forma que seus *pixels* estão projetados e orientados segundo o norte da quadrícula UTM.

O produto PRISM 1B2-RPC é considerado como um produto derivado do PRISM padrão, compreendendo imagens no formato GeoTIFF e respectivos RPCs (RESTEC, 2011).

3.2 Especificações de acurácia

A última calibração do produto padrão PRISM 1B2 foi realizada em 1 de julho de 2009 (JAXA, 2009), e os novos parâmetros foram incorporados na versão 5.09 do *software* de processamento das imagens. As acurácias geométricas absoluta e relativa esperadas após a calibração estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. As medidas de acurácia estão

TABELA 1 - ACURÁCIA GEOMÉTRICA ABSOLUTA ESPERADA APÓS CALIBRAÇÃO DE JULHO DE 2009.

Visada	Direção do Pixel (m) (along track)	Direção da linha (m) (across track)	Dist. (m)	Nº pts de controle	Nº de cenas
Nadir	5,6	5,3	7,8	5.499	586
Forward	4,9	6,1	7,8	1.771	255
Backward	5	7,1	8,7	4.839	525

TABELA 2 - ACURÁCIA GEOMÉTRICA RELATIVA ESPERADA APÓS CALIBRAÇÃO DE JULHO DE 2009.

	Direção do Pixel (m) (along track)	Direção da linha (m) (across track)	Dist. (m)
Desvio padrão dentro de uma cena (1σ)	1,4	1,8	2,4

expressas através do RMSE (*Root Mean Square Error*).

O software desenvolvido pela JAXA-EORC/RESTEC para geração do produto RPC foi atualizado em função dos resultados obtidos com base nas calibrações do produto padrão. A expectativa inicial da JAXA em relação à acurácia do produto obtido via RPC apontava para diferenças pouco significativas em relação à acurácia do produto padrão (RESTEC, 2009), fato confirmado por avaliações posteriores de acurácia, como destacam Takaku e Tadono (2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na região do médio vale do Rio Paraíba do Sul, abrangendo parte do corredor de ligação entre as cidades do Rio de Janeiro e

São Paulo (Figura 3). Esta área é caracterizada pela morfologia de “mar de morros”, com presença de porções convexas ou arredondadas (colinas onduladas) e porções côncavas ou reentrâncias (CORREIA, 2008).

A área de estudo efetiva corresponde a uma região com cerca de 1.220 km², equivalente ao enquadramento da visada nadir do sensor PRISM no modo de observação *triplet* (largura nominal da faixa igual a 35 km). Além da presença da morfologia de “mar de morros”, esta área apresenta altitudes variando da ordem de 340 a 1.900 m.

4.2 Cenas PRISM/ALOS

A Tabela 3 apresenta os principais metadados das cenas PRISM utilizadas no trabalho.

4.3 Levantamentos de campo

Os pontos de controle - estáticos e cinemáticos – utilizados no contexto da pesquisa foram determinados através de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), com emprego de receptores GPS L1 Ashtech Promark2 e utilização de bases locais, com precisões superiores à desejada para os pontos determinados. A distribuição dos pontos levou em consideração a abrangência geográfica, variação altimétrica e diferentes morfologias.

Os pontos determinados por posicionamento relativo estático foram utilizados para a correção geométrica das imagens visando à geração dos

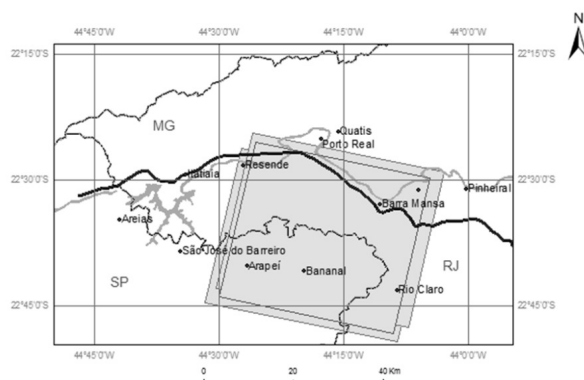


Fig. 3 - Localização da área de estudo.

TABELA 3 – PRINCIPAIS METADADOS DAS CENAS PRISM.

Identificador de Nadir	ALPSMN216394055
Data da aquisição	15/02/2010
Modo de observação	<i>Triplet</i>
Identificador <i>Backward</i>	ALPSMB216394110
Identificador <i>Forward</i>	ALPSMB216394000
Órbita	Descendente
Largura nominal da faixa	35 Km
Nível de processamento	1B2R
Latitude do centro (imagem Nadir)	-22,614°
Longitude do centro (imagem Nadir)	-44,288°
Inclinação transversal à trajetória	-1,2°
Elipsóide de referência	GRS80
<i>Datum</i> planimétrico	ITRF97

MDSs, ou para posterior avaliação global de sua acurácia altimétrica.

Para avaliar, de forma local, o comportamento dos MDSs gerados em áreas com baixa declividade e em áreas de encostas, foram determinados pontos de controle através da técnica de posicionamento relativo cinemático. Esse levantamento foi realizado em áreas com extensões que variaram, aproximadamente, de 2.500 a 40.000 m². Todas as áreas foram percorridas a pé, como forma de melhor caracterizar seu comportamento, segundo um padrão irregular de distribuição dos pontos.

No contexto da pesquisa foram determinados 54 pontos por posicionamento relativo estático e 17.351 por posicionamento relativo cinemático. Deste total, 27 pontos estáticos e 9.776 pontos cinemáticos foram aproveitados de levantamentos anteriores realizados por Correia (2008), segundo a mesma metodologia adotada no contexto deste trabalho.

Todos os pontos de controle considerados nesse trabalho apresentam precisões que satisfazem ao critério de qualidade considerando-se, para escala de 1:10.000, 1/3 dos erros padrão planimétrico (1,0 m) e altimétrico (0,57 m), como sugerido por Merchant (1982).

4.4 Geração dos MDSs

As atividades de correção geométrica das imagens e geração dos MDSs foram realizadas no ambiente LPS - *Leica Photogrammetry Suite 9.2*, através dos módulos *Project Manager* e *Automatic Terrain Extraction* (ATE), respectivamente.

Para geração dos MDSs foram consideradas duas possibilidades de correção geométrica: sem uso de pontos de controle, realizada diretamente a partir dos RPCs fornecidos pela JAXA; e com refinamento da correção, utilizando-se 2 pontos de controle e polinômios de ordem “zero”, visando à modelagem das translações em x e y (Figura 4).

A correção geométrica considerou ao menos duas visadas para formação dos pares estereoscópicos, sejam elas *backward-nadir* (BN), *nadir-forward* (NF) ou *backward-forward* (BF). Os pontos de controle estáticos, no caso da abordagem com refinamento dos RPCs, assim como os pontos de ligação (*tie points*) foram identificados e posicionados de forma manual em cada uma das imagens para, na sequência, proceder ao ajustamento do modelo como um todo, ou seja, considerando-se todas as imagens do projeto simultaneamente. Os resíduos observados nos



Fig.4 - Distribuição dos pontos de controle para refinamento dos RPCs.

pontos de controle e nos *tie points* após ajustamento foram menores que 1 *pixel*.

Quanto ao processo de correspondência para a determinação dos pontos homólogos, o sistema LPS utiliza o coeficiente de correlação como medida de similaridade entre as imagens. Uma vez determinados os pontos correspondentes, as coordenadas tridimensionais são calculadas por interseção espacial.

Após a geração do MDS, pode-se proceder a fase de sua edição. Neste trabalho, a edição bidimensional dos MDSs limitou-se à utilização de recursos automáticos de interpolação e filtragem disponibilizados pelo *software*, no momento de sua extração.

Os MDSs foram gerados na estrutura de grade regular, nas resoluções espaciais de 10 e 20 m. De acordo com LPS (2008), nos MDSs gerados nessa estrutura todas as áreas não correlacionadas são interpoladas.

Relativamente às configurações avançadas oferecidas pelo *software*, foi utilizada a função que gera arquivo *raster* indicativo do *status* da qualidade da correlação (*Create DTM Point Status Output Image*) em cada *pixel*, sendo esta informação útil na análise do produto gerado. Os *pixels* classificados como “*Excellent*” (correlação entre 1 e 0,85), “*Good*” (0,85 a 0,7) e “*Fair*” (0,5 e 0,7) são agrupados de acordo com seus coeficientes de correlação individuais. Já os pontos “*Isolated*” são assim classificados por não apresentarem, em sua vizinhança, pontos cujos coeficientes de correlação permitam agrupamento. Por último, estão os *pixels* classificados como “*Suspicious*” (suspeitos), que são obtidos por interpolação, ao invés de correlação.

Em termos de estratégia para correlação das imagens foram consideradas duas abordagens, por melhor representarem as características da região de estudo:

- *High Mountain*: utiliza uma janela de busca de 27 x 3 *pixels* e uma janela de correlação de 7 x 7 *pixels*. O limiar para o coeficiente de correlação é 0,8. O algoritmo de filtragem (*DTM Filtering*) associado é de suavização moderada (*Smoothing/Moderate*). Os parâmetros internos da filtragem são estabelecidos com base na configuração das opções *Topographic Type* (descrição geral da topografia do terreno) e *Object Type* (ocupação do terreno), configuradas nessa estratégia para montanhoso

(*mountainous*) e área rural (*open area*), respectivamente;

- *Middle Mountains*: apresenta as mesmas características da estratégia anterior, exceto pela janela de busca, reduzida para uma janela de dimensão 21 x 3 *pixels*.

O uso do recurso *DTM Filtering* corresponde, na prática, a uma edição automática do MDS durante o processo de sua extração. De acordo com o tutorial do ATE (LPS, 2008), o processo de filtragem é o seguinte: para cada *pixel* correlacionado é obtido um valor de elevação por interpolação dos valores da vizinhança. Para diferentes configurações dos algoritmos *DTM Filtering*, *Topographic Type* e *Object Type*, um valor de limiar é estabelecido. Se a diferença entre o valor do *pixel* obtido por correlação e o valor interpolado for maior que o limiar estabelecido, o valor interpolado será definido como o valor final do *pixel*. Nesse caso, o *pixel* será classificado como de qualidade suspeita (*Suspicious*). Se a diferença for menor que o limiar, as altitudes interpoladas e obtidas por correlação serão ponderadas, e o valor resultante corresponderá ao valor final do *pixel*. Nesse caso, o *status* original do indicador da qualidade da correlação do ponto (*Excellent*, *Good* ou *Fair*) não será alterado.

5. RESULTADOS

Nos experimentos realizados, os indicadores de sucesso da correlação não apontaram diferenças significativas entre os pares. O par BN apresentou correlação com qualidade ligeiramente superior ao par NF, enquanto que o par BF retornou piores índices de correlação.

Foi possível notar ainda a presença de áreas anômalas nos MDSs gerados. As áreas anômalas são relativamente fáceis de identificar a partir da representação das elevações em escala de tons de cinza, pois estão associadas a um aumento ou diminuição súbita dos valores da elevação em relação a sua vizinhança. Sobrepondo-se os MDSs aos arquivos de sucesso da correlação, essas áreas normalmente estavam associadas à falha na correlação ou correlação inferior a 50%, interpoladas automaticamente durante o processo de extração do MDS. As anomalias mais representativas ocorreram na região mais ao sul da área imageada, devido à extensão de área com cobertura vegetal densa e presença localizada de

nuvens. Vale ressaltar que, além das áreas anômalas citadas, também houve problemas de correlação em trechos do Rio Paraíba do Sul e em outras áreas menores, caracterizadas como áreas homogêneas.

5.1 Avaliação da acurácia altimétrica dos MDSs

Primeiramente, a acurácia altimétrica dos MDSs gerados foi avaliada de forma global, a partir da comparação com pontos de referência altimétrica determinados por posicionamento GPS relativo estático. O MDS mais acurado na avaliação global foi considerado para as avaliações locais da acurácia altimétrica, a partir dos pontos determinados por posicionamento relativo cinemático nas regiões com baixa declividade e nas encostas.

O valor da elevação no MDS, correspondente à posição de cada ponto de referência altimétrica, foi obtido por interpolação bilinear, através da função *Surface Spot* do módulo *3D Analyst Tools*, do *software* ArcGis. Esta função extrai os valores interpolados do MDS e os agrega à tabela de atributos do arquivo *shape* dos pontos de referência.

O erro altimétrico (e_{ai}) foi obtido a partir da comparação entre o MDS e o conjunto de pontos de referência, conforme apresentado na Equação 3:

$$e_{ai} = H_{dc_i} - H_r \quad (3)$$

onde:

H_{dc_i} : altitude interpolada do MDS;

H_r : altitude do ponto de referência.

O padrão de acurácia altimétrica considerado foi o estabelecido pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional, através do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), conforme Decreto-lei nº. 89.817 de 1984 (BRASIL, 1984).

O erro padrão amostral (EP) equivale, no referido Decreto-lei, à raiz quadrada do erro quadrático médio (EQM). Neste trabalho, o EQM altimétrico, ou EP altimétrico, foi calculado conforme a Equação 4:

$$EQM = EP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{ai})^2}{n-1}} \quad (4)$$

onde n representa o total de elementos da amostra.

Conforme estabelece o Decreto-lei nº. 89.817, o EP altimétrico esperado para os MDSs foi calculado com base na equidistância entre as curvas de nível. Neste trabalho, foram consideradas as equidistâncias usuais para as escalas de mapeamento sistemático brasileiro, quais sejam: 1:10.000 (5 m), 1:25.000 (10 m); 1:50.000 (20 m) e 1:100.000 (50 m).

Ainda de acordo com o referido Decreto-lei, o PEC (Equação 5) corresponde a 1,6449 vezes o EP, e equivale ao erro máximo admitido para uma determinada escala, ao nível de confiança estatística de 90%.

$$PEC = 1,6449 \cdot EP \quad (5)$$

Os resultados das análises apresentadas nas próximas seções basearam-se na comparação dos erros altimétricos dos MDSs com os valores de EP e PEC esperados para os produtos, segundo as escalas de mapeamento consideradas.

5.1.1 Análise global

O conjunto amostral reuniu um total de 54 pontos de referência altimétrica, com distribuição que procurou contemplar a variação altimétrica do conjunto de pontos determinados (Figura 5).

Os MDSs receberam uma codificação para melhor identificá-los, já que resultaram da combinação de diferentes configurações. Através dessa codificação, o MDS é identificado de acordo com a combinação dos pares estereoscópicos utilizada (BN-NF-BF, BN-NF), número “ x ” de pontos de controle utilizados na abordagem (x PC), resolução espacial “ y ” do modelo em metros (y m) e tipo de estratégia utilizada (HM- *High Mountains*, MM- *Middle Mountains*).

Exemplificando: para o MDS denominado “BN-NF-BF_2PC_10m_HM”, subentende-se que foi obtido considerando-se os 3 (três) pares

estereoscópicos simultaneamente, com uso de 2 pontos de controle para correção das imagens, resolução espacial de 10 m e estratégia de correlação *High Mountain*. Cada MDS gerado também está associado a um identificador (ID) sequencial, conforme apresentado na Tabela 4.

O MDS 3, em negrito, apresentou a melhor acurácia dentre os modelos gerados. Com 10 m de resolução espacial, esse MDS resultou da correção geométrica com refinamento dos RPCs, considerando-se os 3 (três) pares estereoscópicos e estratégia HM. O refinamento dos RPCs proporcionou resultado significativo, quando comparado ao resultado obtido sem pontos de controle, ou seja, sem refinamento, que resultou no MDS 1, compatível com a escala 1:50.000, classe B.

O MDS 6, extraído segundo as mesmas configurações e resolução espacial do MDS 3, mas considerando-se apenas 2 (dois) pares estereoscópicos, apresentou resultado equivalente ao MDS 3. O MDS 5 diferiu das configurações do MDS 3 apenas no tipo de estratégia de extração (MM). Essa estratégia, que utiliza uma janela de busca de correlação menor que a estratégia HM, produziu um MDS menos acurado (Escala 1:50.000 - classe A), equivalente ao MDS 4, gerado com resolução de 20 m.

Tomando-se como referência o MDS 3, por ser o mais acurado do conjunto, foi criado o gráfico de discrepâncias relativas ao erro altimétrico para cada ponto do conjunto amostral (Figura 6). Observa-se que os maiores erros altimétricos estão associados aos pontos B08, B11 e B14, localizados em área de baixa declividade, e V-P13, localizado em encosta.

Os arquivos indicadores do sucesso da correlação apontam para valor “suspeito” da elevação nos *pixels* correspondentes aos pontos B14 e V-P13, o que poderia justificar o erro, visto que, nesses casos, a elevação foi obtida por

TABELA 4 - RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES GLOBAIS.

ID	MDS MRPC	Estatísticas do erro altimétrico (m)						Classificação	
		Mín	Máx	Med	DP	EQM	PEC	Escala	Classe
1	BN-NF-BF_0PC_10m_HM	-15,58	18,41	1,66	6,24	6,46	10,63	1:50.000	B
2	BN-NF-BF_0PC_20m_HM	-37,55	14,47	-5,85	10,63	12,16	20,01	1:100.000	A
3	BN-NF-BF_2PC_10m_HM	-7,2	4,85	-0,48	2,09	2,15	3,53	1:25.000	A
4	BN-NF-BF_2PC_20m_HM	-20,46	10,17	-1,01	4,85	4,96	8,15	1:50.000	A
5	BN-NF-BF_2PC_10m_MM	-29,47	4,24	-1,19	4,55	4,71	7,74	1:50.000	A
6	BN-NF_2PC_10m_HM	-7,31	4,14	-0,53	2,15	2,22	3,65	1:25.000	A

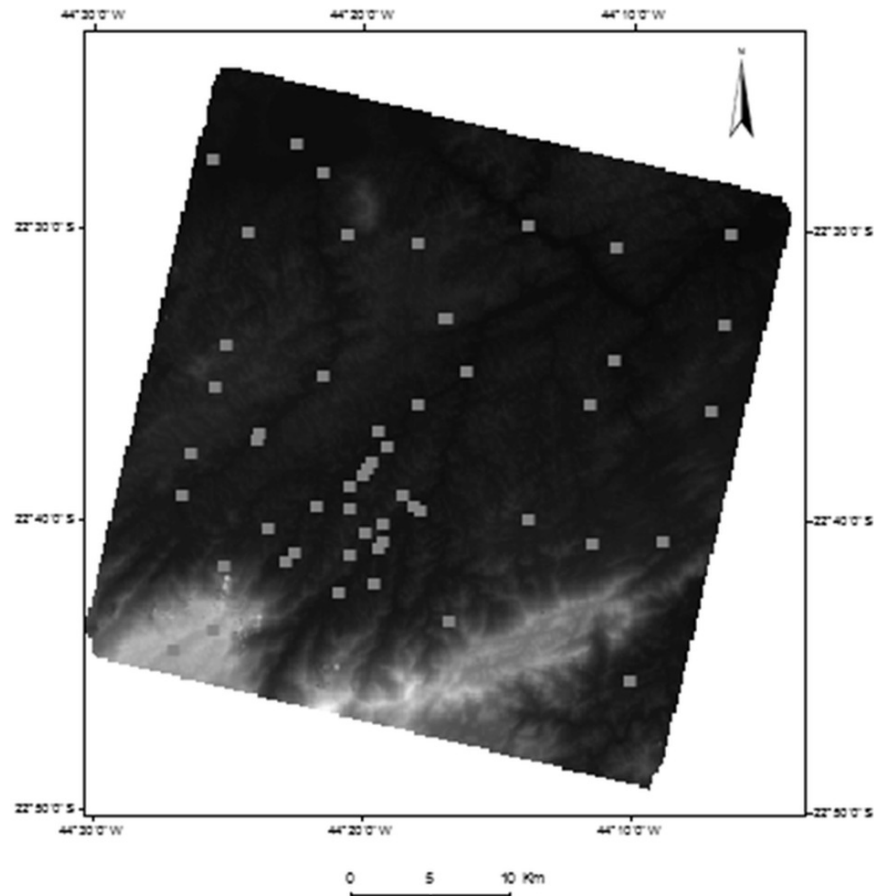


Fig.5 - Distribuição dos pontos de controle estáticos.

interpolação, ao invés de correlação. Já para os pontos B08 e B11 a correlação foi classificada como “boa”. Nesse caso, a fonte do erro pode estar associada a outros fatores, que demandam pesquisas adicionais para seu esclarecimento.

Como dito, uma característica comum aos pontos B08, B11 e B14 é que se referem a localizações em áreas com baixa declividade. Tal fato, *a priori*, poderia sugerir que o erro planimétrico do MDS não afetaria significativamente a análise altimétrica. No entanto, vale ressaltar algumas características destas áreas, que apresentam

diferenças no que diz respeito à sua relação de vizinhança, o que pode ter influenciado no erro altimétrico do MDS nesses pontos. Os pontos B08 e B14 foram determinados no platô de um morro, e o ponto B11 foi determinado em uma planície de inundação (Figura 7).

Para o caso em estudo, tais situações poderiam ser a causa para os resultados apresentados.

O gráfico mostrado na Figura 8 permite visualizar o comportamento do erro altimétrico do

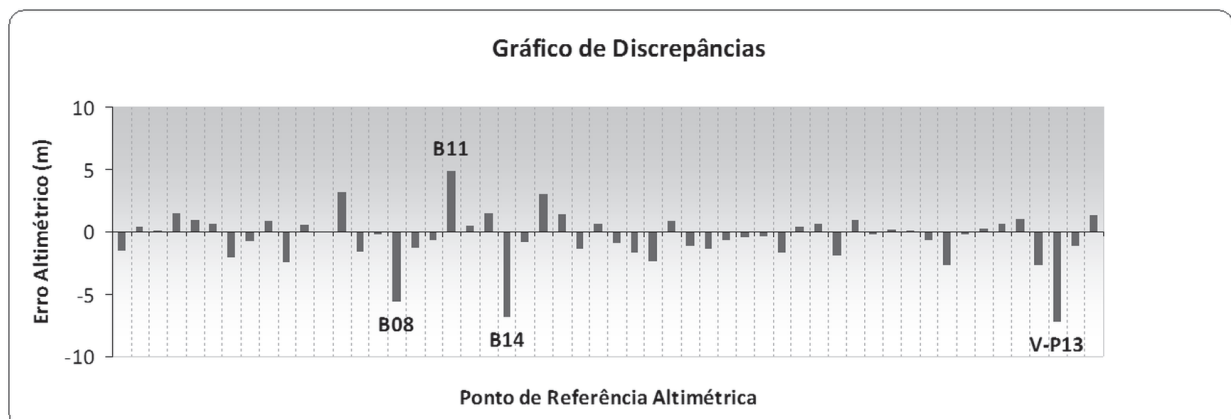


Fig. 6 - Erros altimétricos observados no MDS 3.

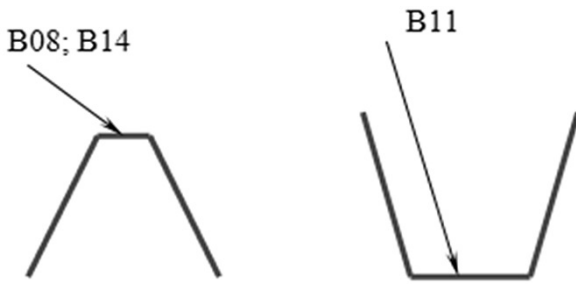


Fig. 7 - Tipos de perfis topográficos nas regiões de pontos de referência altimétrica.

MDS 3, relativamente à altitude do ponto de referência considerado.

5.1.2 Análise local

Para a avaliação local da acurácia altimétrica do MDS 3 foram selecionadas 16 superfícies distintas, sendo 12 determinadas em área de baixa declividade e 4 determinadas em áreas de encostas, distribuídas na região de estudo conforme a Figura 9. Essas superfícies foram determinadas em áreas sem cobertura vegetal ou edificações, onde o MDS se confunde localmente com o MDT.

O conjunto amostral usado na análise foi composto por 17.351 pontos, sendo 8.658 em áreas de baixa declividade e 8.693 em áreas de encostas. Todas as áreas estão localizadas em regiões com altitudes variando de 300 a 600 m, aproximadamente, com exceção de uma única superfície de baixa declividade, localizada na Serra da Bocaina, com altitude em torno de 1.460 m.

Inicialmente, foi considerada a possibilidade de se gerar MDSs a partir de cada conjunto de pontos definidores das superfícies para, a partir daí, realizar a comparação por subtração dos MDSs. Entretanto, essa comparação somente seria válida no caso da inexistência de deslocamento planimétrico entre eles. Um eventual deslocamento

planimétrico entre os MDSs poderia retornar valores equivocados de elevação para uma dada posição. Adicionalmente, um MDS gerado por interpolação, a partir de um conjunto de pontos, constituiria um novo produto, sujeito a erros decorrentes do processo. Por isso, antes de ser usado como referência, haveria a necessidade de avaliar sua acurácia posicional. Por esses motivos, optou-se pelo uso direto do dado bruto, ou seja, dos próprios pontos, por representarem a verdade de campo.

Para conhecimento do parâmetro declividade foram considerados intervalos de declividade, ao invés das declividades relativas, calculadas para cada conjunto amostral de referência altimétrica. Para obtenção desses intervalos, primeiramente foram gerados os modelos digitais de terreno (MDTs) construídos a partir da interpolação dos pontos de referência determinados por posicionamento relativo cinemático em cada superfície, para, em seguida, derivar os respectivos mapas de declividade. Os MDTs e mapas de declividade foram gerados no ambiente ArcGIS, módulo *3D Analyst*, através das funções *Topo to Raster* e *Slope*, respectivamente.

As análises locais da acurácia altimétrica foram realizadas apenas para o MDS 3, classificado na avaliação global como compatível com a escala 1:25.000, classe A. Cada uma das 16 superfícies foi analisada separadamente, sendo identificadas pelos códigos BDSUP (baixa declividade) e ENCSUP (áreas em encostas).

As análises estatísticas locais revelaram compatibilidade do MDS 3 para escalas que variaram de 1:10.000 a 1:50.000, dependendo da área analisada. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

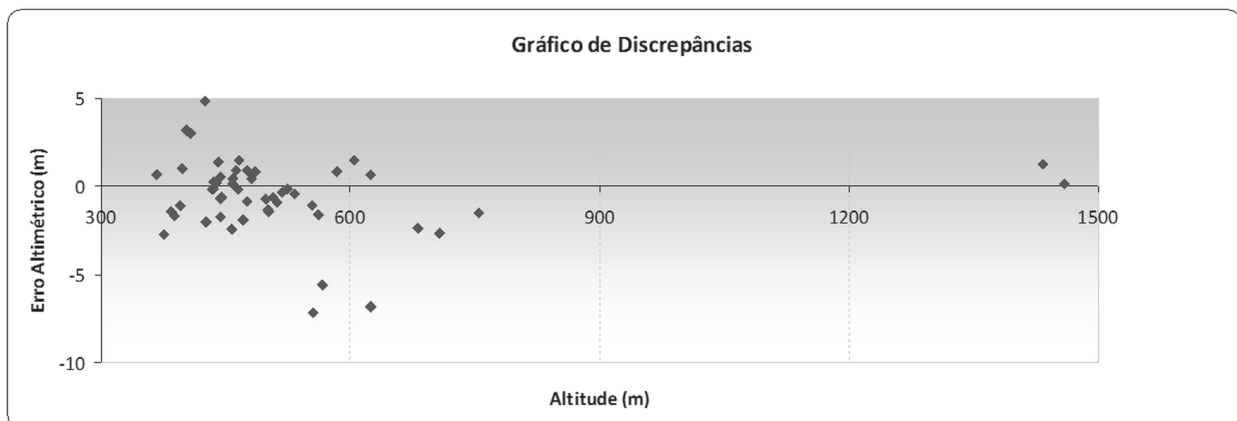


Fig. 8 - Erros altimétricos *versus* altitudes para o MDS 3.

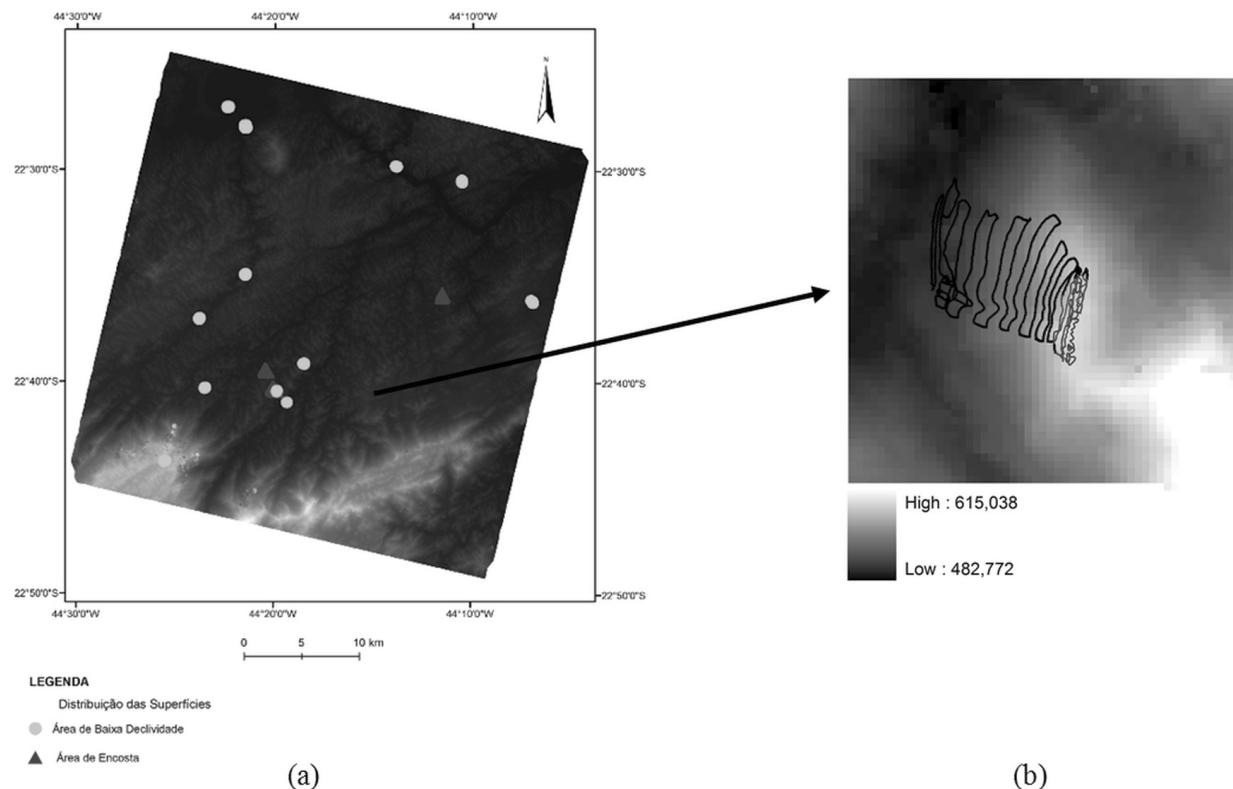


Fig. 9 - Distribuição das superfícies visando às análises locais (a) e detalhe de superfície analisada (b). Já a BDSUP_PV18 está localizada em uma área de desmatamento, entre duas encostas, porém com boa identificação na imagem.

As declividades nas superfícies BDSUP, calculadas a partir dos MDTs gerados dos pontos do conjunto amostral, variaram de 0° a 12°, aproximadamente. De acordo com a Embrapa (1995), valores dentro desse intervalo correspondem a terrenos classificados como plano/praticamente plano (0° a 3°), suave ondulado (3° a 8°) e moderadamente ondulado (8° a 13°).

As declividades observadas nas ENCSUPs variaram de 0° a 31°. Além de apresentarem porções do terreno com declividades equivalentes às BDSUPs, essas áreas apresentaram ainda porções classificadas como ondulado (13° a 20°) e forte ondulado (20° a 45°).

Como pode ser observado na Tabela 5, o MDS 3 mostrou-se mais acurado nas áreas de baixa declividade, com exceção de BDSUP_B08 e BDSUP_B14. Vale salientar que os pontos de controle altimétricos estáticos B08 e B14, medidos nas respectivas superfícies, também retornaram erros altimétricos elevados na avaliação global do MDS 3.

Das áreas BDSUP apresentadas na Tabela 5, a maioria é caracterizada por áreas extensas de baixa declividade, com exceção das BDSUP_B08, BDSUP_B14 e BDSUP_PV18, que têm como

característica áreas de maior declividade em sua vizinhança.

A BDSUP_B14 apresenta altitude média de 622 m, correspondendo à superfície de maior altitude depois da BDSUP_PV18 (1.460 m). A altitude média em BDSUP_B08 é de 560 m e, tal como a BDSUP_B14, foi determinada no platô de um morro.

Apesar das características semelhantes quanto à existência de maiores declividades nas imediações dessas três áreas, a avaliação indicou maior acurácia na BDSUP_PV18. A cobertura vegetal nas BDSUPs_B14 e B08 é rasteira, do tipo pasto, relativamente homogênea, e os indicadores de sucesso da correlação na fase de extração do MDS 3 apontaram a existência de valores de elevação “suspeitos” e “isolados” nas duas superfícies analisadas. Deste modo, a baixa correlação pode ser justificada, pelo menos em parte, como consequência da homogeneidade e ambiguidade.

No entanto, esse tipo de cobertura também caracteriza outras áreas de BDSUPs que apresentaram melhores resultados em termos de acurácia altimétrica. Tal fato pode ter ocorrido devido à existência de pequenas regiões dentro de uma mesma superfície, suscetíveis a falhas na

TABELA 5 - RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES LOCAIS DO MDS3.

Superfície	Total de Pontos	Estatísticas do erro altimétrico (m)						Classificação	
		Min	Max	Med	DP	EQM	PEC	Escala	Classe
BDSUP_P01	567	-1,59	3,01	0,66	0,95	1,16	1,90	1:10.000	A
BDSUP_P05	910	-19,42	3,12	-0,46	2,33	2,37	3,90	1:25.000	A
BDSUP_P07	780	-4,17	1,78	-0,66	1,64	1,77	2,91	1:25.000	A
BDSUP_P08	668	-4,75	0,51	-1,93	1,09	2,22	3,65	1:25.000	A
BDSUP_P11	678	-2,81	0,72	-1,01	0,68	1,22	2,00	1:10.000	A
BDSUP_P14	1025	-2,11	3,64	0,24	1,11	1,13	1,86	1:10.000	A
BDSUP_PV18	955	-3,17	2,17	0,05	1,07	1,07	1,76	1:10.000	A
BDSUP_B08	480	-11,54	-0,07	-5,04	1,83	5,37	8,83	1:50.000	A
BDSUP_B09	855	-3,05	3,34	-0,17	1,36	1,37	2,25	1:10.000	A
BDSUP_B13	884	-3,54	5,25	1,71	1,52	2,28	3,76	1:25.000	A
BDSUP_B14	533	-10,25	-0,92	-6,49	2,09	6,83	11,23	1:50.000	B
BDSUP_Rubião Jr.	323	-1,24	1,87	-0,48	0,53	0,71	1,17	1:10.000	A
ENCSUP_05	3019	-13,74	12,40	-2,38	4,98	5,52	9,09	1:50.000	A
ENCSUP_06	1325	-14,36	3,26	-4,74	3,10	5,67	9,33	1:50.000	A
ENCSUP_07	2357	-15,63	9,47	-2,02	4,59	5,01	8,24	1:50.000	A
ENCSUP_P13	1992	-13,07	17,10	-0,66	5,50	5,54	9,11	1:50.000	A

correlação. Como por exemplo, a BDSUP_P05, que apresenta o maior erro altimétrico absoluto dentre todas as superfícies (19,42 m), mas a classificação dessa área como um todo ficou dentro da acurácia altimétrica esperada (1:25.000, classe A).

A BDSUP_P05 apresenta altitude média de 397 m, baixa declividade (0° a $1,6^\circ$, de acordo com o mapa de declividade correspondente) e cobertura homogênea do solo. Esta última característica pode ter contribuído para falhas na correlação das imagens. Analisando-se o arquivo de sucesso da correlação correspondente ao MDS 3, os maiores erros altimétricos absolutos observados em BDSUP-P05 estavam associados a uma pequena área classificada como de elevação “suspeita”. No entanto, esses erros, que ocorreram de forma isolada, não comprometeram significativamente o conjunto, que apresentou compatibilidade com a escala de 1:25.000, classe A.

Diante deste contexto, não foram encontradas outras evidências que pudessem justificar a classificação obtida em BDSUP_B08 e BDSUP_B14 - 1:50.000, classes A e B, respectivamente - relativamente às demais superfícies de baixa declividade - 1:25.000 ou 1:10.000, classe A, a não ser pelo fato de que essas duas superfícies estão localizadas no topo de morros, próximo ao divisor de águas.

No que diz respeito às superfícies determinadas nas regiões de encostas, todas

apresentaram resultados compatíveis com a escala 1:50.000, classe A. Dentre as superfícies determinadas em encostas, a ENCSUP_P13, com altitude média de 522 m, e declividades variando de $0,6^\circ$ a 25° , apresentou a maior variação do erro altimétrico. Essa característica, contudo, não interferiu na sua classificação final. A Figura 10 apresenta a vista de topo e um perfil topográfico do terreno nessa área.

Deve-se ressaltar que, de modo geral, os resultados apresentados na Tabela 5 indicaram a presença de erros que podem ter diferentes origens. Dentre elas poderiam ser apontadas aquelas decorrentes do processo de correlação, consequência da homogeneidade e ambiguidade em algumas regiões, bem como da mudança na resposta dos alvos em função do ponto de vista. Além disso, pode-se considerar o algoritmo de interpolação, associado à amostragem dos dados disponíveis, geometria de aquisição das imagens e ruídos inerentes ao sensor, agravados por regiões com maior declividade.

A fim de se avaliar o comportamento do erro altimétrico relativamente à declividade, foram gerados gráficos de dispersão correspondentes a um perfil para as superfícies BDSUP_P05 e ENCSUP_P13. A primeira apresenta o maior erro altimétrico do conjunto amostral, e a segunda a maior variação do erro altimétrico.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 11 e 12 o eixo das ordenadas foi colocado como

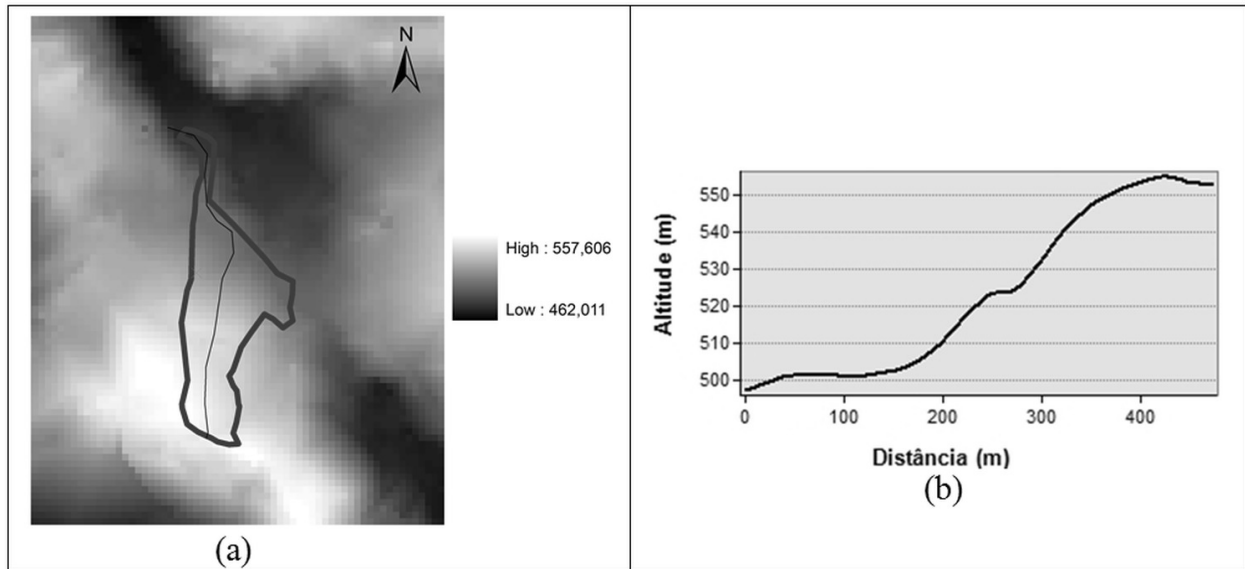


Fig.10 - Vista de topo (a) e perfil topográfico (b) de ENCSUP_P13.

adimensional, uma vez que pode representar tanto a variável declividade (graus) quanto erro altimétrico (m), conforme o caso.

Pode-se notar pelo gráfico da Figura 11, que para alguns pontos na referida região o erro altimétrico é mais acentuado, que acredita-se ser resultado de falha na correlação. Ainda analisando esta figura, percebe-se que apesar da baixa correlação entre a declividade e o erro altimétrico, verifica-se que o erro altimétrico apresenta-se baixo para essa região, categorizada por plana/praticamente plana. Além disso, ao observar a Figura 12, que apresenta regiões categorizadas como ondulada e forte ondulada, percebe-se que existe, em parte dos pontos, uma maior correlação

entre a declividade e erro altimétrico e que os erros de modo geral são mais acentuados.

Embora tenham sido mostrados os gráficos para apenas duas regiões, foi possível perceber, para algumas das regiões analisadas, que existe uma maior correlação entre erros observados em MDTs/ MDSs e a declividade, como indicam outros trabalhos (LI, 1990; HYYPPÄ *et al.*, 2005; ZALOTI-JUNIOR *et al.*, 2007; TOZ e ERDOGAN, 2008; SOUZA *et al.*, 2009).

6. CONCLUSÕES

Os resultados alcançados na análise global indicaram que a acurácia altimétrica esperada para os MDSs gerados está diretamente vinculada ao

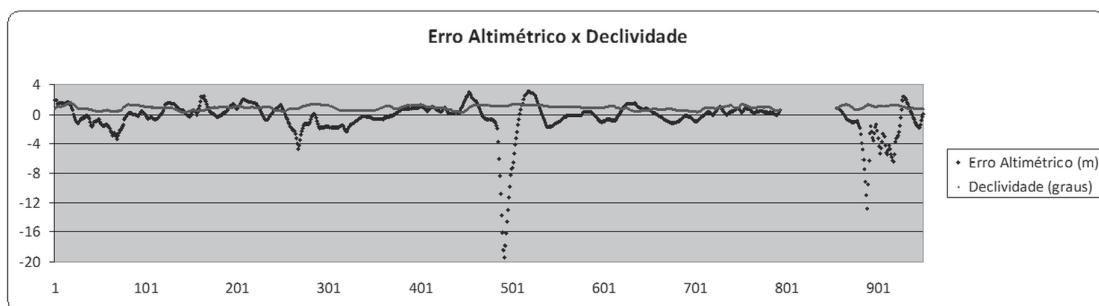


Fig. 11 - Gráfico de dispersão relacionando o erro altimétrico com a declividade em BDSUP_P05.

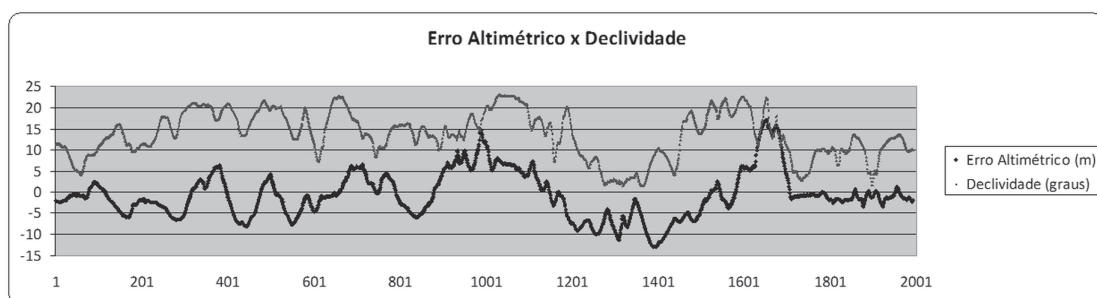


Fig.12 - Gráfico de dispersão relacionando o erro altimétrico com a declividade em ENCSUP_P13.

refinamento dos RPCs. A resolução espacial dos MDSs também influenciou nos resultados, sinalizando que a acurácia vertical é diretamente proporcional à resolução espacial do modelo. Outro aspecto analisado se refere à estratégia de correlação das imagens, pois foi observado que, para uma mesma resolução espacial (MDS 3 e 5), a mudança no tamanho da janela de busca no processo de correlação também influenciou na acurácia do produto gerado (1:25.000 e 1:50.000, respectivamente).

Ainda quanto à análise global, a não utilização do par estereoscópico *backward/forward* (BF) no experimento que resultou no MDS 6 não influenciou na sua classificação final, equivalente ao MDS 3, gerado a partir dos três pares estereoscópicos (BN, NF e BF). Devido ao uso da função que utiliza como valor final do *pixel* do MDS aquele resultante da melhor correlação, o resultado do MDS 6 sugere que, embora as visadas inclinadas sejam interessantes do ponto de vista geométrico, devido a maior relação base/altura, a maior variação radiométrica pode, por outro lado, comprometer o sucesso da correlação.

Todos os MDSs gerados nesse trabalho apresentaram áreas com falhas na correlação decorrentes, pelo menos em parte, da homogeneidade e ambiguidade dessas áreas. Também foram detectadas áreas anômalas e ruídos, sugerindo, com base nas amostras utilizadas como referência altimétrica, que a solução dada pelos algoritmos de interpolação para áreas não correlacionadas pode não ser satisfatória. Dessa forma, vale alertar quanto à necessidade de edição do MDS após sua geração, visando tratar essas áreas, bem como ressaltar a importância do conjunto amostral utilizado para validação do MDS. A inexistência de pontos de verificação do MDS nos locais interpolados pelo sistema pode levar a classificações equivocadas do MDS em análise.

Quanto às análises locais para avaliação da acurácia altimétrica segundo diferentes morfologias e altitudes, os resultados alcançados apontaram MDSs compatíveis com escalas que variaram de 1:10.000, classe A, a 1:50.000, classe B. Embora não tenha sido evidenciada uma correlação direta entre o erro altimétrico e a declividade em todos os casos, as análises locais sugerem que a variável declividade, associada a fatores descritos anteriormente, proporcionou degradação da

acurácia altimétrica dos MDSs. Entretanto, tendo em vista os resultados alcançados nas análises locais, acredita-se que outras fontes de erro, além das mencionadas anteriormente, podem estar associadas ao processo de geração de MDSs, demandando pesquisas adicionais para seu esclarecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos seguintes profissionais e instituições:

- Ao IBGE, pela concessão de afastamento do primeiro autor para o desenvolvimento do trabalho de mestrado junto à UFV – Universidade Federal de Viçosa;

- Ao Dr. Takeo Tadono, da JAXA, pelo fornecimento gratuito dos RPCs do sensor PRISM/ALOS;

- Ao Dr. José Duarte Correia, do IBGE, pela cessão dos dados provenientes dos levantamentos GPS realizados no contexto de seu doutorado, bem como pelo suporte técnico e;

- A Prof.^a Dr.^a. Naíse de Oliveira, da UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, por viabilizar a campanha para determinação dos novos pontos de controle na área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. **Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jun. 1984.

CHENG, P.; TOUTIN, T. Orthorectification and DEM generation from high resolution satellite data. In.: **ACRS - Asian Conference on Remote Sensing**, 22., 2001, Singapura. p. 1203-1208.

CORREIA, J. D. **Mapeamento de feições deposicionais quaternárias por imagens orbitais de alta resolução espacial** – médio vale do rio Paraíba do Sul. 2008. 662 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

DIAL, G., GRODECKI, J. RPC replacement camera models. In: **ASPRS 2005 Annual Conference**, 2005. Baltimore, Maryland, 2005. p. 1-9.

EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER (EORC); JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **ALOS PRISM level 1**

- product format descriptions**. 2007. Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/format.htm>>. Acesso em 20 mar. 2010
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras**. 3 ed. em. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.
- FRASER, C. S.; DIAL, G.; GRODECKI, J. Sensor orientation via RPCs. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, p. 182-194, 2006.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Avaliação planialtimétrica de dados ALOS/PRISM**. Estudo de Caso: Itaguaí – RJ. Relatório Técnico, 2009.
- GRODECKI, J. Ikonos stereo feature extraction - RPC approach. In: **ASPRS 2001 Annual Conference**, St. Louis, Missouri, 2001.
- HU, Y.; TAO, V.; CROITORU, A. Understanding the rational function model: methods and applications. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, ISPRS Congress, 20, 2004, Istanbul, Turkey. p. 663-668.
- HYYPPÄ, H.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; KAASALAINEN, S.; HONKAVAARA, E.; RÖNNHOLM, P. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Workshop Laser Scanning 2005**, 2005, Enschede, The Netherlands. p. 85-90.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **PRISM level 1B2 data products**. In: Calibration result of JAXA standard products (as of July 1, 2009). 2009. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/en/hatoyama/satellite/data_tekyo_setsumeialos_hyouka_e.htm>. Acesso em: 04 abr. 2011.
- LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE (LPS). **Automatic Terrain Extraction – user’s guide**. Leica Geosystems Geospatial Imaging, 2008. 154 p.
- LI, Z. **Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling**. Ph.D. thesis, The University of Glasgow, 1990. 299 p.
- LI, Z.; GRUENA. Automatic DSM generation from linear array imagery data. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, ISPRS Congress, 20, 2004, Istanbul, Turkey. p. 1-6.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 318 p.
- MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: **American Congress on Surveying and Mapping**, 1982, Denver. p. 222-231.
- REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **The geometric accuracy evaluation results of RPC (Ver.1.5)**. In: Products & Services. Derivative-work products/service. 2009. Disponível em: <http://www.alos-restec.jp/pdf/RPC_ver15result_e.pdf>. Acesso em 01 mar. 2011.
- REMOTE SENSING TECHNOLOGY CENTER OF JAPAN (RESTEC). **Derivative-work products: ALOS/data**. 2011. Disponível em: <<http://www.alos-restec.jp/en/staticpages/index.php/products-additional-value>>. Acesso em 25 out. 2011.
- SOUZA, E. M. F. R.; CRUZ, C. B. M.; SILVA, R. B.; CARVALHO, I. H. C. Análise de MDE Radarsat 1 em área de relevo misto no entorno da Baía de Guanabara/RJ: planimetria, altimetria, declividade e uso do solo. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 14., 2009. p. 7497-7504.
- TAKAKU J.; TADONO T. PRISM geometric validation and DSM generation status. In: **The First Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto**, 2007, Kyoto, Japan. p. 1-4.
- TAKAKU J., TADONO, T. RPC generations on PRISM/AVNIR-2 level 1B2 images. In: **ALOS PI Symposium 2009**. Kailua-Kona, Hawaii, USA, 2009.
- TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G. Determination of the indirect orientation of orbital images using control straight lines. In: **The**

Photogrammetric Record, v. 25(130), p.159–179, June 2010.

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

TOZ, G.; ERDOGAN, M. DEM (digital elevation model) production and accuracy modeling of DEMs from 1:35.000 scale aerial photographs. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, ISPRS Congress, 21., 2008, Beijing, China. p. 775-780.

XU, J. Z. **The rational function model in photogrammetric mapping: methods and**

accuracies. 2004. 64 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciências da Terra e Espaço & Engenharia, Universidade York, Ontario, Canadá, 2004. Disponível em: <<http://www.geoict.yorku.ca/test-page/papers/past-researchers-papers/Final-report-Jeff.pdf>>. Acesso em 11 mar. 2011.

ZALOTI-JUNIOR, 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. p. 5043-5050.