

Correção de modelos de elevação INSAR através de superfícies de erros geradas por triangulação linear a partir de dados GPS e estações geodésicas eletrônicas.

Marcos Antônio Timbó Elmiro^{1,2}
Luciano Vieira Dutra²
José Cláudio Mura²

¹Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG/IGC
Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte – MG
mtimbo@ufmg.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 – CP. 515 - 12227-010 – São José dos Campos – SP
dutra@dpi.inpe.br, mura@dpi.inpe.br

Abstract. Digital elevation models (DEM) are numerical representation of terrain elevation used in a wide range of spatial analysis applications. As DEM applications are becoming more widespread, so does concern about the quality of the available elevation data and the propagation of DEM errors through the analysis. However, currently available DEMs frequently report only the average magnitude of DEM errors as the root mean square error (RMSE), which does not provide information on systematic bias nor on the spatial patterns of the DEM errors. This paper presents a methodology of DEM error correction that includes determination of global and local accuracy spatial pattern. The correction method calculates an error compensation surface determined by triangulation with linear interpolation. The correction surface will be added to DEM in a pixel by pixel basis. Results showed that application of proposed correction method, besides improving DEM geometric quality, also provided statistically confident numerical estimation of DEM global and local accuracy.

Palavras-chave: geometric correction, digital terrain model, Delaunay triangulation, correção geométrica, modelo digital de terreno, triangulação de Delaunay.

1. Apresentação

Um ponto muito importante quando se utilizam dados de sensoriamento remoto para fins de mapeamento dos recursos da Terra é a questão da correção dos erros e fidelidade geométrica dos produtos, visando a atingir os padrões especificados e aceitos para as diferentes escalas de mapeamento cartográfico. A legislação brasileira estabelece, através do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que 90% dos pontos bem definidos em um documento cartográfico, não poderão ter erro planimétrico superior a 0.5 mm na escala do mapeamento e o erro altimétrico deve ser menor que metade da equidistância adotada para as curvas de níveis (Timbó Elmiro, 1994). Padrões muito similares são adotados nos diversos países do mundo afora.

No caso de dados tridimensionais para modelos digitais de terrenos (MDT) podemos distinguir duas formas gerais de correção para ajustá-los o melhor possível à realidade geográfica do terreno. Uma das formas baseia-se no conhecimento preciso e na modelagem adequada da natureza e magnitude das fontes de erros envolvidas no processo de aquisição. Consiste em uma técnica efetiva e adequada quando toda a geometria do imageamento é muito bem caracterizada. Entretanto, apresenta a desvantagem de depender de dados e parâmetros precisos da plataforma, do sensor e do meio ambiente.

A outra forma geral de correção é baseada no estabelecimento de relações matemáticas de mapeamento entre coordenadas de feições imageadas (pixels ou voxels) e as correspondentes coordenadas cartesianas dessas mesmas feições no terreno referenciadas a um sistema cartográfico. Tais relações de mapeamento e modelagem corrigem a geometria dos dados imageados trazendo-os para sua correspondência com à realidade geográfica, independente do

conhecimento da natureza das distorções e de quaisquer informações da plataforma de aquisição. Devido a esta independência este método tem se mostrado muito flexível e, com base nele, diversos esforços têm sido empreendidos para resolver problemas gerais de correção geométrica e registro de pontos e superfícies tridimensionais (Audette et al., 2000; Gruen e Akca, 2005). Apesar das muitas iniciativas, ainda existem necessidades de contribuições relevantes, principalmente na correção e no alinhamento de conjuntos de pontos e superfícies de forma não totalmente rígida e no aperfeiçoamento de mecanismos para controle e garantia da qualidade interna dos produtos corrigidos (Pottmann et al., 2004). Soluções satisfatórias merecem ser ainda pesquisadas, desenvolvidas, executadas e testadas, principalmente para aplicações de mapeamento topográfico.

O presente trabalho utiliza modelos digitais de elevação (MDE) provenientes de interferometria SAR obtidos na região amazônica para testar a eficácia de um método de correção de MDE baseado em superfícies de erros determinadas por triangulação com interpolação linear. Os modelos tridimensionais em uso foram obtidos a partir de um sistema SAR de polarimetria completa da banda P e de polarização HH na banda X da AeroSensing RadarSysteme GmbH que realizou vôos na Floresta Nacional do Tapajós e suas imediações. Foram coletados dados para interferometria em banda P de duas passagens e interferometria em banda X de passagem única, tendo sido produzidos Modelos Digitais de Elevação (MDE) nas duas bandas. A radiação da banda X teoricamente não penetra na massa de vegetação e o MDE resultante refere-se potencialmente ao topo da floresta, enquanto a radiação da banda P, de maior comprimento de onda, penetra na massa de vegetação indo atingir o solo de onde é retroespalhada, permitindo gerar potencialmente um modelo digital relativo ao chão da floresta (Hofmann et al, 1999). Estudos anteriores realizados na mesma área de trabalho revelaram a necessidade de aplicar correção e tratamentos geométricos mais completos aos dados SAR (Dutra et al, 2002; Timbó Elmiro et al, 2003; Moura, 2005; Mura et al 2001).

Dentro desse enfoque, o presente trabalho tem objetivo de fazer uma avaliação da qualidade altimétrica do modelo de elevação produzido pelo método InSAR em banda P e, a partir de referências cartográficas determinadas em campo, ajustá-lo á realidade geográfica através da incorporação de uma superfície de correção determinada por triangulação com interpolação linear. A superfície de correção em formato de grade regular será adicionada ao modelo em uma base pixel a pixel. A eficácia do método de correção será avaliada pela análise de estatísticas que certifiquem a qualidade local e global. As referências cartográficas de controle usadas para geração da superfície de correção consistem de diversos pontos de campo obtidos ao longo de estradas, clareiras, pastagens e outras áreas apropriadas para teste. Análises finais revelaram que os dados altimétricos produzidos em banda P necessitam de correções antes de serem utilizadas em outras aplicações e que o método aplicado melhorou a qualidade geométrica do modelo fornecendo estimativas de precisão global e local.

2. Área de estudo

A área geográfica de onde foram obtidos os dados para teste é um trecho da Floresta Nacional do Tapajós, situada ao sul da cidade de Santarém, no baixo curso do Rio Tapajós, às margens da BR-167 Cuiabá-Santarém, próxima ao povoado de São Jorge, no Estado do Pará . A região de estudo tem como limites as coordenadas geográficas de 55°00'02"W a 54°53'56"W, em longitude e de 03°11'08"S a 03°03'56"S, em latitude, no sistema WGS84, abrangendo uma área de 143 Km² (11,12 x 12,91 Km), cuja localização pode ser vista sobreposta a uma imagem Landsat na **Figura 1**. A área é caracterizada pela ocorrência de floresta primária, regenerações florestais de diferentes estágios de crescimento, pastagens e alguns trechos de solo descoberto. Na região predomina o latossolo amarelo distrófico de baixa fertilidade natural, o qual associado à falta de infra-estrutura leva a um aproveitamento limitado. Com a

derrubada da floresta o solo é utilizado principalmente para a pecuária extensiva e, freqüentemente posteriormente abandonado, conduzindo a modificações de origem antrópica na paisagem, caracterizando se principalmente por pastagens e por diversos graus de regeneração nas pastagens abandonadas (Moura, 2005)

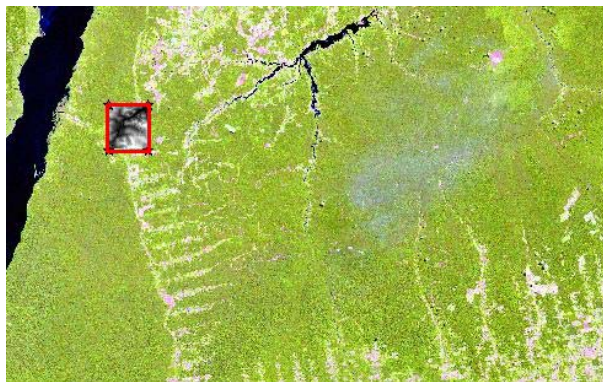


Fig. 1 – Imagem Landsat com a localização da área de estudo próxima ao Rio Tapajós.

3. Materiais e metodologia

A metodologia para abordagem do problema envolve a implementação de vários procedimentos e a utilização de materiais e métodos cuja síntese consiste dos passos a seguir:

1. Aquisição dos dados topográficos de controle de campo e do MDE InSAR em banda P;
2. Avaliação preliminar da qualidade do modelo InSAR original;
3. Registro e conversão dos dados para um único sistema geodésico de referência (WGS84);
4. Identificação e eliminação de *outliers* no MDE InSAR banda X;
5. Classificação e seleção de pontos de controle de campo confiáveis e coerentes;
6. Teste de tendências globais de inclinação do MDE InSAR banda P e verificação da presença de erros do tipo picos e vales típicos de problemas locais;
7. Ajuste e correção altimétrica do MDE InSAR banda P a partir dos pontos de controle; e
8. Extração de informações do MDE InSAR banda P corrigido.

Cada um dos tópicos acompanhado de detalhes importantes da sua implementação serão brevemente caracterizados.

3.1. Aquisição dos dados de campo e do MDE InSAR

Os dados em banda P da Floresta Nacional do Tapajós a serem submetidos à correção estão disponibilizados na forma de imagens de superfícies em formato de grade regular de 2,5x2,5m representando diretamente a estrutura tridimensional da cena. Os dados da estrutura de controle medidos em campo estão disponibilizados sob forma conjuntos ou nuvens de pontos de forma livre. Estes pontos de terreno ou as superfícies tridimensionais interpoladas a partir deles constituem a estrutura fundamental de controle cartográfico de onde foram extraídas todas as medidas para avaliação e correção do modelo digital de elevação.

Os dados de campo utilizados nesse trabalho foram coletados na Floresta Nacional do Tapajós em várias campanhas realizadas entre os anos 2000 e 2005. Segue-se uma breve descrição de algumas características dos dados e dos detalhes de aquisição. Os pontos de controle de campo com a finalidade de testar e calibrar o modelo banda P foram obtidos através de levantamentos topográficos com estações geodésicas eletrônicas e por meio de rastreamento de satélites do sistema GPS utilizando métodos de posicionamento relativo em dupla freqüência. Foram coletados cerca de 3000 pontos os quais são considerados isentos de erros devido a exatidão dos métodos de levantamentos utilizados que garantem erro máximo da ordem de 5 cm em planimetria e altimetria (Moura, 2005; Timbó Elmiro et al, 2003).

O modelo digital de elevação em banda P foi obtido com o sistema Radar aerotransportado AeS-1 (AeroSensing Radar Systeme GmbH). O sistema SAR produz imageamento de polarização completa da banda P ($\lambda = 72$ cm) obtidos na frequência de 415 MHz, com largura de banda de 70 MHz e ângulo de depressão de 45° e dados HH da banda X na frequência de 9.6 GHz, com largura de banda de 400 MHz, na altitude média de 3.216 m (Moreira, 1996). As cenas da banda P têm pixels com resolução em range de 1,5 m e em azimute de 0,7 m (1 look slant range).

3.2. Avaliação preliminar do modelo original

Os princípios físicos e fundamentos teóricos do sensoriamento remoto por radar e as características dos instrumentos e métodos de coleta dos dados de campo pressupõem a hipótese de que as medidas do DEM em banda P devem produzir resultados de altitudes similares aos obtidos nas medidas de campo quando feitas sobre áreas descobertas tais como as estradas, campos arados, pastagens e solos nus. (Baltzer, 2001). Outra hipótese considerada é a de que os dados em estudo estão perfeitamente georeferenciados horizontalmente e os erros que se pretende corrigir ocorrem somente em termos de altitudes. Estas hipóteses foram reforçadas pela existência de um ótimo pré alinhamento horizontal dos conjuntos de dados confirmado através de análises numéricas simplificadas e pela comparação com imagens do espectro ótico da região de estudo. Assim, as correções, testes e avaliações foram realizadas somente sobre a componente vertical do modelo digital.

As avaliações preliminares feitas por análises numéricas simplificadas, integração com imagens óticas e comparações de superfícies contendo os valores InSAR em banda P confirmaram a existência de um bom pré-alinhamento horizontal, porém revelaram a existência de vários *outliers* e a necessidade de calibração em altitude. Estes problemas se devem principalmente a algumas falhas ocorridas no sistema inercial da aeronave durante os vôos além da diferença de resolução horizontal da banda P (2,5 m) em relação aos pontos da estrutura de controle topográfica (5 cm). Assim, torna-se necessária a correção dos modelos banda P para garantir melhoria da precisão e aumentar o potencial de aplicações gerais.

3.3. Ajuste altimétrico do modelo por um plano de *offset*

Toda a quantificação dos erros e correção de dados foi feita através da confrontação com a estrutura de pontos topográficos de controle de campo. Os pontos de controle selecionados foram divididos em dois conjuntos, um para cálculo da superfície de erros e outro para fazer verificações e testes. Inicialmente um plano de *offset* ótimo foi determinado pela média das diferenças de altitude entre os pontos topográficos e os pontos do modelo InSAR correspondentes. O processo foi feito usando os próprios conjuntos de dados topográficos na forma de nuvens de pontos e localizando os seus correspondentes nos modelos InSAR. Precedendo ao cálculo do plano de *offset* foram feitos vários esforços iterativos para eliminação de *outliers* a fim chegar ao melhor resultado possível. A formulação matemática utilizada para determinação do plano de *offset* ótimo é dada por

$$e_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (h_T - h_S) \quad (1)$$

e a precisão do *offset* (RMS) dada por

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (h_T - h_S)^2} \quad (2)$$

onde N é o total de pontos de controle utilizados, h_T é altitude medida por topografia e h_S é a altitude medida pelo sensor de banda P (Dutra et al., 2002; Timbó Elmiro et al., 2003).

Tomou-se o cuidado de utilizar somente os pontos situados em áreas onde não havia cobertura vegetal no ano de 2000, época da coleta de todos os dados InSAR. A **Tabela 1** mostra resultados da qualidade da correção que foi monitorada em termos de análise dos mínimos, máximos, médias, variâncias, desvios absolutos e desvios padrão os quais foram usados também para identificação e remoção de *outliers*.

TABELA 1 – Resumo da qualidade da correção usando um plano de *offset*.

	Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio. Abs.	Desvio. Padrão
Cálculo	-11.24	6.76	-0.38	6.77	2.18	2.60
Teste	-7.05	8.34	0.19	4.40	1.60	2.10

Para reforçar o processo de avaliação do modelo original InSAR banda P foi feita também uma análise preliminar que consiste na aplicação de um teste para verificar a ocorrência de tendências globais de inclinação em torno dos eixos coordenados X e Y nos modelos InSAR. Para este propósito foram selecionados alguns grupos de pontos da estrutura de controle topográfica distribuídos na área de estudo. Em cada um dos grupos de pontos topográficos foi calculado um valor de erro médio altimétrico. Os erros foram submetidos a um modelo de ajuste linear do tipo $y=A+Bx$ para ambos os eixos coordenados X e Y separadamente. Os resultados mostraram coeficientes de inclinação (B) muito pequenos em ambos os eixos para o modelo InSAR banda P. Os erros médios de cada grupo de pontos para o modelo são mostrados por uma representação em símbolos proporcionais ao seu valor na **Figura 2**.

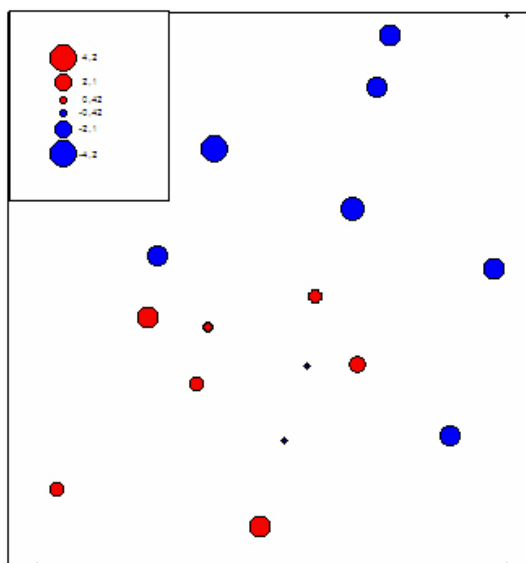


Fig. 2 – Erros em vários grupos de pontos mostrando uma sucessão de picos e vales característicos de erros locais.

A análise geral desta avaliação inicial permitiu perceber que não existem tendências globais de inclinação no modelo, observando-se uma sucessão de picos e vales característicos de erros tipicamente locais de valores variáveis que sugere a necessidade de correção por métodos mais flexíveis baseadas em modelos não rígidos e elásticos (Heuvelink, 1998).

3.4. Correção do modelo pelo método da triangulação com interpolação linear

Para fazer uma correção mais adequada aos erros locais detectados no tópico anterior, utilizaremos uma superfície de erros a ser determinada por triangulação com interpolação linear a partir dos pontos de controle de campo. O método de triangulação com interpolação

linear utiliza a triangulação otimizada de Delaunay (Shewchuk, 1999). A rede de triangulação de Delaunay de um determinado conjunto de pontos pode ser definida como a malha de triângulos construídos obedecendo ao critério do circuncírculo: o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém no seu interior nenhum ponto do conjunto de amostras além dos vértices do próprio triângulo (Câmara et al., 2001). O algoritmo de Delaunay cria triângulos desenhando linhas entre os pontos de amostras. Os pontos de amostras originais são conectados de forma que nenhuma borda do triângulo é cruzada por outros triângulos. É um procedimento que maximiza os menores ângulos dos triângulos formados e minimiza os maiores circuncírculos, dando uma melhor representação do objeto de interesse (Shewchuk, 1999). O resultado é um bloco formado por remendos de faces triangulares sobre toda a extensão da grade. Cada um dos triângulos define um plano sobre os pontos da grade que encontram-se dentro do triângulo. A inclinação e a elevação do triângulo é determinada pelos três pontos de dados originais que definem o triângulo. Todos os nós da grade dentro de um triângulo dado são definidos pela superfície triangular. O método de triangulação com interpolação linear funciona bem quando os dados de amostra são distribuídos uniformemente sobre a área da grade. Conjuntos de dados mal distribuídos resultam em faces triangulares diferentes do geral. A **Figura 3** mostra uma representação da superfície de correção determinada por triangulação linear com destaque para a localização dos pontos de amostra.

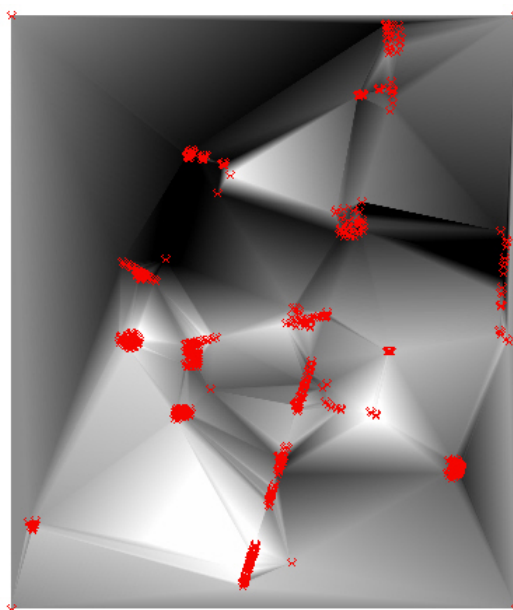


Fig. 3 – Superfície de correção por triangulação linear, destacando os pontos de amostra.

A implementação dos algoritmos para solução do problema foi realizada através da linguagem IDL (Integrated Development Language) e suas funções. A **Tabela 2** mostra um resumo dos resultados numéricos da qualidade da correção feita pelo método da triangulação com interpolação linear. A qualidade do processo foi monitorada em termos de análise dos mínimos, máximos, médias, variâncias, desvios absolutos e desvios padrão.

TABELA 2 – Resumo da qualidade da correção por triangulação com interpolação linear.

	Mínimos	Máximos	Média	Variância	Desvio Abs.	Desvio Padrão
Cálculo	-10.97	6.76	-0.74	4.44	1.69	2.11
Teste	-5.61	8.39	0.25	4.59	1.67	2.14

Os erros do modelo InSAR foram definidos pela diferença altimétrica entre os pontos de controle de campo e seus correspondentes no modelo InSAR. Os pontos de erros foram triangulados produzindo uma grade triangular irregular com base no algoritmo de Delaunay. A superfície de correção foi definida pelo refinamento da grade triangular em uma grade regular de 2,5 x 2,5 m. A **Figura 4** mostra o modelo InSAR banda P submetido a correção pelo método da triangulação com interpolação linear para geração da grade regular.

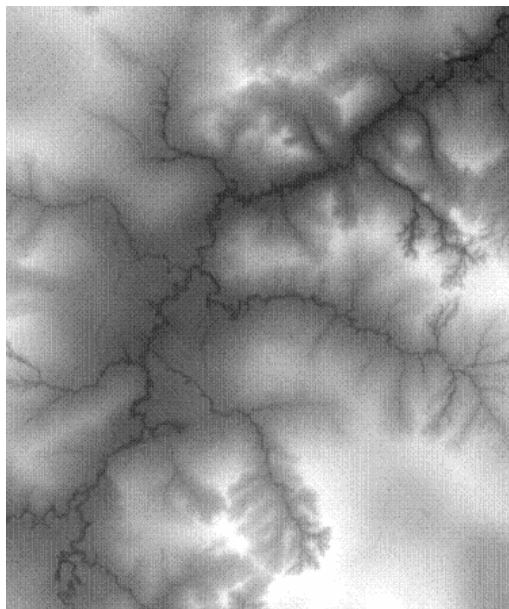


Fig. 4 – Modelo InSAR banda P ajustado pela superfície de correção triangular.

3.5. Análise de resultados

A correção altimétrica pelo método da superfície de ajuste determinada por triangulação com interpolação linear permitiu um ajuste geométrico muito mais flexível e adaptável para o modelo InSAR original do que o simples *offset* por um plano de altitude constante. Enquanto o *offset* aplica o mesmo valor constante de correção para todos os pontos ao longo do modelo, o método da triangulação corrige mais onde os erros são maiores e menos onde os erros são menores. As **Tabelas 1 e 2** refletem numericamente estas considerações, onde tanto os pontos de cálculo como os pontos de teste apresentaram números mais favoráveis ao método da triangulação com interpolação linear.

4. Conclusões e considerações finais

Correção altimétrica de modelos InSAR ainda é assunto de estudos recentes, portanto conclusões e afirmações definitivas, principalmente nas aplicações em ambientes de florestas tropicais como a Amazônia ainda são objeto de investigações. Entretanto, os resultados do trabalho permitem vislumbrar o grande potencial de aplicações de dados InSAR em banda P, quando devidamente submetidos a correções não rígidas, para mapeamento altimétrico de regiões amazônicas cuja topografia em resolução fina permanece até hoje desconhecida, constituindo um obstáculo para o desenvolvimento regional. É possível vislumbrar que as aplicações dessa tecnologia poderão ser estendidas a outras áreas territoriais que apresentam densa cobertura florestal. Coberturas florestais têm sido até o presente momento uma grande dificuldade para a representação precisa do relevo através do método da fotogrametria. Assim, é muito importante que hajam fases intermediárias de avaliação e de correção de erros antes da utilização de MDE InSAR em outras aplicações. Procedimentos para avaliar e corrigir modelos tridimensionais derivados de interferometria SAR nos moldes realizados neste

trabalho podem representar importante contribuição para futuras aplicações, tendo em vista o potencial que eles representam para validação de enormes quantidades de dados e informações de mapeamentos de recursos da Terra que podem ser obtidas por técnicas automáticas, independentes de interferências atmosféricas e de ampla cobertura. Para melhor garantia de conclusões consistentes, serão utilizados em futuros trabalhos os dados de outros sensores adquiridos na região tais como a banda X e a banda C. Além disso será feito também um investimento na melhoria da correção utilizando métodos baseados em transformações não rígidas através de polinômios fragmentados, splines e outros modelos mais elásticos.

Referências

- Audette, M.A., Ferrie, F.P. and Peters, T.M. (2000), An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging. **Medical Image Analysis**, 4, 201-217.
- Baltzer, H. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (InSAR). **Progress in Physical Geography**. 25, 2 pp. 159-177, 2001.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. **Introdução à Ciência da Informação**. [online], 2001. <www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>. Visitado em 11 out. 2006.
- Dutra, L.V.; Timbó Elmiro, M.; Mura, J.C.; Freitas, C.C.; Santos, J.R.; Soares-Filho, B.S. Araujo, L.S.; Albuquerque, P.C.G.; Vieira, P.R.; Gama, F.F. Assessment of Digital Elevation Models obtained in Brazilian Amazon based on P and X band Airborne Interferometric Data In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS'02**. June 24-28, 2002. Toronto, Canadá. pp.VI:3614-3616.
- Gruen, A. and Akca, D. (2005), *Least squares 3D surface matching*. In: **ASPRS 2005 Annual Conference**. Proceedings. Baltimore, Maryland, March 7-11, 2005.
- Heuvelink, G.B.M. (1998), *Error Propagation in Environmental Modelling with GIS*, Taylor & Francis, London.
- Hofmann, C.; Schwäbisch, M.; Och, S.; Wimmer, C.; Moreira, J.; Multipath P-Band Interferometry – First Results. In: **Canadian Symposium on Remote Sensing**. *Proceedings*, Ontário, Canada, June, 1999.
- Moreira, J. Design of an Airborne Interferometric SAR for High Precision DEM Generation, In: **XVIII ISPRS Congress, Proceedings**, Vol. XXI, Part B2, Commission II (Wien), pp. 256-260, 1996
- Moura, P. **Calibração dos modelos digitais de elevação gerados por interferometria SAR nas bandas P e X**. São José dos Campos - SP. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, 2005.
- Mura, J.C.; Bins, L.S.; Gama, F.F.; Freitas, C.C.; Santos, J.R.; Dutra, L.V. Identification of the Tropical Forest in Brazilian Amazon based on the DEM difference from P and X bands interferometric data. In: **2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Sydney, Australia, July, 09-13, 2001. Scanning the present and resolving the future. Sydney, Australia, *Proceedings* (CDROM), IEEE
- Pottmann, H., Leopoldseder, S. and Hofer, M. (2004), Registration without ICP. **Computer Vision and Image Understanding**, 95 (1), 54-71.
- Shewchuk, J. R. **Lecture Notes on Delaunay Mesh Generation**. Berkeley, CA. - Department of Electrical and Computer Science, University of California at Berkeley, 1999.
- Timbó Elmiro, M. A. **Técnicas de processamento digital de imagens para mapeamento por carta-imagem**. São José dos Campos - SP. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, 1994.
- Timbó Elmiro, M.; Dutra L. V.; Mura J. C.; Albuquerque P. C.G.; Freitas C. C.; Santos J. R.; Araújo L. S.; Neef, T. Avaliação de Modelos Digitais de Terrenos e Modelos Digitais de Superfície Utilizando Metodologia INSAR de Duas Freqüências In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2003, Belo Horizonte. **Anais**. SBC, 2003.