

# **AVALIAÇÃO DE DADOS DE ALTIMETRIA DA FLORESTA AMAZÔNICA BASEADOS NAS TECNOLOGIAS INSAR, LIDAR E GPS**

*Assessment of Altimetry Data in Amazonian Forest Based in INSAR, LIDAR, and  
GPS Technologies*

**Marcos Antônio Timbó Elmiro<sup>1</sup>**  
**Luciano Vieira Dutra<sup>2</sup>**  
**José Cláudio Mura<sup>2</sup>**  
**João Roberto dos Santos<sup>3</sup>**  
**Corina da Costa Freitas<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG**  
**Instituto de Geociências - Departamento de Cartografia**  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha - CEP: 31270-901 – Belo Horizonte – MG  
mtimbo@ufmg.br

**<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**  
**Divisão de Processamento de Imagens – DPI**  
Av. dos Astronautas, 1758 – CP. 515 - CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP  
dutra@dpi.inpe.br  
mura@dpi.inpe.br  
corina@dpi.inpe.br

**<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**  
**Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR**  
Av. dos Astronautas, 1758 – CP. 515 - CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP  
jroberto@dsr.inpe.br

## **RESUMO**

Vários experimentos que proporcionaram grande disponibilidade de dados de altimetria foram realizados na Floresta Nacional do Tapajós no Estado do Pará. Alguns dados foram produzidos utilizando tecnologias da fronteira do conhecimento cujas potencialidades ainda estão em processo de investigação e sendo atualmente objeto de ativas pesquisas. Em 1999, foram coletados perfis de laser (LiDAR - Light Detection and Ranging) associados a dados de videografia. Em 2000, foram coletados dados aerotransportados de interferometria Radar (InSAR) em multifrequência. Os dados InSAR quando coletados em banda P produzem potencialmente um modelo digital do terreno (MDT) devido à penetração da radiação através do dossel da floresta, podendo atingir o chão. Quando coletados em banda X, os dados InSAR produzem potencialmente um modelo digital de superfície (MDS) do topo da floresta. A disponibilidade do modelo digital do terreno correspondente ao chão e do modelo digital de superfície correspondente ao topo da floresta é de grande interesse para aplicações cartográficas e medidas da biomassa em grandes extensões. Ainda no ano 2000, a missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) proporcionou cobertura global de dados SAR interferométricos em banda C e banda X, proporcionando o aproveitamento destes dados na região de estudo. Em 2001, 2002, 2003 e 2005 foram coletados diversos pontos de controle utilizando receptores GPS geodésicos de dupla frequência e métodos topográficos de poligonação e irradiação através de estações totais. O objetivo deste trabalho é fazer uma avaliação de erros incorporados aos dados dos múltiplos sensores utilizados na área de estudo que afetam os modelos tridimensionais produzidos por estas tecnologias avançadas e corrigir os erros para que os modelos tridimensionais possam ser utilizados em aplicações subseqüentes. Foi desenvolvida uma forma de correção que permitiu reduzir alguns dos erros encontrados onde a metodologia consiste na aplicação de uma translação em altitude adequadamente determinada. Ficou demonstrado que a correção aplicada melhorou a qualidade final e os modelos calibrados apresentaram resultados globais e locais melhores do que os modelos originais.

**Palavras chaves:** LiDAR, Interferometria SAR, SRTM, Modelo Digital de Terreno, Modelo Digital de Superfície.

## ABSTRACT

There is a great amount of altimetry data collected by several experiments taken in the Tapajós National Forest located in the Brazilian Amazon State of Pará. Some of these data were produced by current *state of the art* technology whose effectiveness is still being proven by scientific investigations. In 1999 LiDAR profiles associated to videography data were taken in the region. In 2000 it was collected P and X band interferometric multifrequency data over areas of different vegetation types. The backscatter response collected by P band radar antenna potentially produces a real digital terrain model (DTM) due to its penetration capability across forest canopy toward the soil. When collected in X band radiation is reflected in the top forest canopy which produces a digital surface model (DSM). The availability of digital terrain model and digital surface model covering the same forested area is of great interest for many purposes, especially cartographic applications and carbon stock estimation. Also in 2000, the SRTM mission provided global interferometric cover in C and X bands that permitted the use of these data in the present work. In 2001, 2002, 2003 e 2005 several field control positions were surveyed using GPS dual frequency receivers and by topography surveying methods using total stations. The purpose of this work is to make an evaluation of the errors affecting the original multiple sensor data collected in the study area and apply an effective correction in order to eliminate those errors to permit using the models in other applications. An effective correction type was developed that reduced the original errors. The correction methodology consisted in altimetry *offset* determination and its application to the original data. Evaluations confirmed that the correction methodology produced good results and the corrected models presented global and local errors lesser than those in the original models.

**Keywords:** LiDAR, SAR Interferometry, SRTM, Digital Terrain Model, Digital Surface Model.

### 1. INTRODUÇÃO

O mapeamento topográfico da Amazônia utilizando os métodos convencionais de fotogrametria tem sido ao longo dos anos uma tarefa bastante difícil, principalmente no que concerne a altimetria. As técnicas de fotogrametria permitem a reconstrução da geometria de aquisição das imagens, possibilitando a obtenção das coordenadas tridimensionais associadas aos objetos imageados e a extração de diversas informações. São técnicas testadas, consolidadas e largamente utilizadas em diversas aplicações de mapeamento (CROSETTO e ARAGUES, 1999). Entretanto, estas técnicas somente podem ser aplicadas para o mapeamento de alvos que estejam diretamente no campo visual da câmara aérea, não podendo haver interferência de obstáculos superficiais, tais como cobertura vegetal ou interferências atmosféricas como cobertura de nuvens, sendo pouco eficazes no caso da Amazônia, região extremamente carente de mapeamento.

A dimensão do problema da Amazônia pode ser melhor avaliada quando se olham os seus cinco milhões de km<sup>2</sup> de área dos quais  $\frac{3}{4}$  são completamente revestidos por densa cobertura florestal, permanecendo grande parte do ano coberta por nuvens. É possível que este problema de enormes dimensões tenha sua resposta proporcionada pelo avanço da tecnologia de interferometria SAR da banda P (HOFMANN et al, 1999). A radiação do espectro das microondas em banda P, além de atravessar as nuvens, atravessa também a massa de vegetação podendo potencialmente atingir o solo da floresta (DUTRA et al. 2002).

Um sistema de polarimetria completa da banda P e de polarização HH na banda X da *AeroSensing RadarSysteme GmbH* realizou alguns vôos na Floresta Nacional do Tapajós e nas suas imediações como parte de um projeto de cooperação entre o INPE e a Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. Nesta campanha 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). Precedendo os vôos, foram instalados refletores de cantos em vários pontos para assegurar a adequada correção dos MDE.

A radiação da banda X, de menor comprimento de onda, não penetra na massa de vegetação, portanto o MDE resultante refere-se ao topo da floresta. Já 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 relativo ao chão da floresta. A diferença entre o modelo do topo e do chão produz um modelo digital de alturas da floresta. Estudos anteriores realizadas na mesma área utilizando dados de alguns dos sensores abordados neste trabalho revelaram a necessidade correção e tratamentos mais completos dos dados (DUTRA et al, 2002; TIMBÓ ELMIRO et al, 2003; MOURA, 2005). Outros trabalhos realizados nesta mesma área de estudo também reforçam estas demandas (MURA et al 2001; FREITAS et al 2001; SANTOS et al 2001).

Em extensas áreas de densa cobertura florestal, particularmente na presença constante de nuvens os únicos métodos tecnicamente e economicamente viáveis para levantamentos são aqueles capazes de prover ampla cobertura e que exigem poucos pontos de

controle de terreno, tal como as técnicas InSAR e LiDAR. Assim, trabalhos que contribuam para avaliar a eficácia destes métodos, expondo problemas e qualidades potenciais e que possam contribuir para corrigir erros e melhorar a qualidade geométrica são muito importantes.

### 1.1 Objetivos

Dentro desse enfoque, o presente trabalho tem os seguintes objetivos: fazer uma avaliação da qualidade dos modelos altimétricos produzidos pelo método InSAR na Floresta Nacional do Tapajós após aplicar uma correção a estes modelos através de uma translação em altitude adequadamente estimada; avaliar a eficácia do método de correção aplicado; e utilizar os modelos InSAR corrigidos pelo método proposto para avaliar o potencial de geração de produtos derivados de análises de MDT e MDS tais como modelos digitais de alturas (MDA) de florestas, estruturas de florestas e perfis de superfícies. A busca dos objetivos envolve a integração e comparação dos dados InSAR, dados altimétricos de perfilamento LiDAR, medidas de estações topográficas eletrônicas (estações totais), levantamentos GPS por métodos diferenciais e inventários florestais disponíveis da região de estudo.

Na busca de atingir esses objetivos o trabalho também investiga possíveis respostas para questões importantes que ainda não foram totalmente esclarecidas em relação às novas tecnologias de mapeamento através de InSAR e LiDAR, tais como: a radiação da banda P penetra até o nível do solo em qualquer tipo de cobertura vegetal? A radiação da banda X retorna ao encontrar o topo das copas das árvores? A banda C do SRTM penetra na floresta mais que a banda X? É possível extrair altitude do chão e do topo da floresta a partir dos dados LiDAR? A resposta do chão do LiDAR é compatível com a resposta da banda P? A resposta do topo do LiDAR é compatível com a resposta da banda X?

### 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área geográfica onde se desenvolve o presente estudo é parte da Floresta Nacional do Tapajós, situada ao sul da cidade de Santarém, no baixo curso do Rio Tapajós, as margens da BR-167 CUIABÁ-SANTARÉM, próxima ao povoado de São Jorge, no Estado do Pará.

A área tem como limites as coordenadas geográficas de 55°06'07"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 287 Km<sup>2</sup> (22,24 x 12,91 Km), cuja localização pode ser vista na Figura 1. A área possui 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, frequentemente 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)

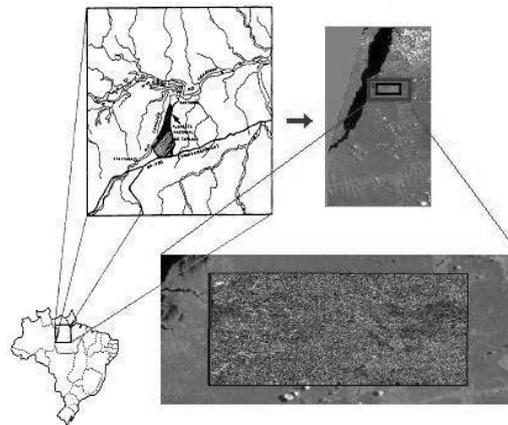


Fig. 1- Localização da área de estudo (Floresta Nacional do Tapajós).

### 3. METODOLOGIA

Para responder às questões enfocadas nos objetivos, foram selecionadas áreas de amostras distribuídas ao longo da região de estudo englobando trechos de florestas, regenerações de diferentes estágios de crescimento e áreas sem cobertura vegetal. As amostras foram submetidas a medições, comparações e análises envolvendo os dados altimétricos produzidos pelos diferentes sensores em estudo. As diferentes análises revelaram que os dados de altitude produzidos pelas novas tecnologias necessitam de correções antes de serem utilizadas em outras aplicações que derivam dados de MDE. A metodologia adotada para abordagem do problema foi composta de diferentes etapas e para melhor compreensão o fluxograma da Figura 2 apresenta a estrutura geral da metodologia onde são destacados os principais passos e seus inter-relacionamentos. Cada tópico, assim como os detalhes importantes para sua viabilização serão brevemente abordados.

Os dados InSAR em banda X, banda P e banda C da Floresta Nacional do Tapajós a serem corrigidos estão disponibilizados sob a forma de imagens de superfícies em formato de grade regular (2.5D) que representam diretamente a estrutura tridimensional da cena. Os dados topográficos de controle medidos em campo estão disponibilizados sob forma de nuvens ou conjuntos de pontos de forma livre e os dados LIDAR sob a forma de perfis com amostras espaçadas de cerca de 30 cm.

Os conjuntos de pontos topográficos ou as superfícies tridimensionais interpoladas a partir deles constituem a estrutura fundamental de controle de onde

foram extraídas todas as medidas para correção dos modelos altimétricos.

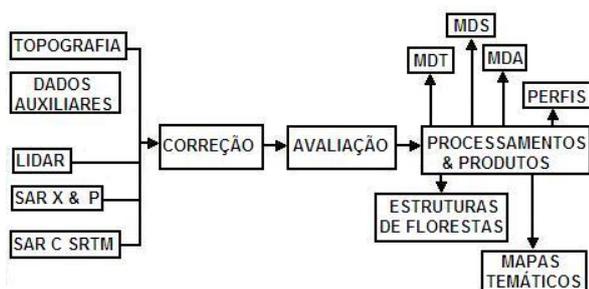


Fig. 2 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.

### 3.1 Aquisição dos dados

Os dados de campo utilizados nesse trabalho de pesquisa foram coletados na região de estudo (Floresta Nacional do Tapajós) em diversas campanhas realizadas nos anos de 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 e 2005. A fim de prover uma visão geral segue-se uma breve descrição de algumas características dos diferentes tipos de dados e dos detalhes de aquisição.

#### 3.1.1 Dados topográficos de controle de campo

Para a realização das diferentes análises foram utilizados como referência os dados topográficos de controle levantados no campo. Esses pontos de controle com a finalidade de testar e calibrar os dados dos diferentes sensores em estudo foram obtidos em trabalhos de campo realizados nos anos de 2002 e 2003, tendo sido coletados cerca de 3000 pontos, obtidos por topografia eletrônica e por rastreamento de satélites do sistema GPS. Diversos pontos GPS foram obtidos ao longo de estradas, clareiras, pastagens e outras áreas descobertas apropriadas para teste. Como o método GPS não produz bons resultados sob a cobertura vegetal foi feita também a coleta de vários pontos de controle no chão da floresta, utilizando estações totais.

O método GPS adotado para obtenção de pontos de controle foi o posicionamento relativo com processamento da fase das portadoras. Utilizou-se o método de posicionamento estático para pontos monumentados e o método estático rápido foi usado na medição de outros pontos sem previsão de re-ocupação. Foram utilizados receptores de uma e de duas frequências fazendo sempre medidas relativas a uma única base instalada em um marco geodésico próximo ao centro da área de estudo, de forma que o máximo afastamento da base para quaisquer pontos medidos foi da ordem de 10 km. Somente foram aproveitados os pontos GPS com solução inteira para as ambiguidades. Os levantamentos com estações totais foram utilizados principalmente onde houve dificuldades de operação com o GPS, tal como na mata densa e nas regenerações mais altas. Esses levantamentos foram sempre apoiados por dois ou mais pontos GPS monumentados no solo e foram controlados por poligonais fechadas ou através de irradiações curtas. A combinação desses métodos garante uma precisão final da ordem de alguns

centímetros, bem acima das necessidades deste estudo, portanto, para efeito do presente trabalho os dados de controle foram considerados isentos de erros. Os dados levantados no campo foram classificados segundo o tipo de cobertura vegetal, tendo em vista a hipótese de que em áreas de vegetação rasteira, estradas e campos preparados para cultivo os modelos interferométricos gerados com os dados em bandas P, X e C (SRTM), bem como os dados de perfilamento LiDAR devem apresentar os mesmos valores de altitude. Foram considerados três tipos distintos de cobertura: floresta, regeneração e outros. Receberam a classificação de outros as áreas com pouca cobertura vegetal ou com cobertura vegetal rasteira, isto é, áreas de gramínea, pasto limpo, pasto sujo, estradas e áreas preparadas para agricultura. A Figura 3 mostra uma imagem TM em tons de cinza, resultante de uma composição RGB 543 obtida no ano 2000, cobrindo a área de estudo e contendo a localização dos dados de coordenadas tridimensionais levantados em campo por GPS e estação total em vários trechos da região. Os pontos claros correspondem aos dados levantados em 2002 e os pontos escuros aos dados de 2003 (MOURA, 2005). Na imagem TM podem ser identificadas regiões de floresta primária, diferentes gradações de regenerações correspondentes a diferentes estágios de crescimento, campos de pastagens e alguns trechos de solos descobertos.

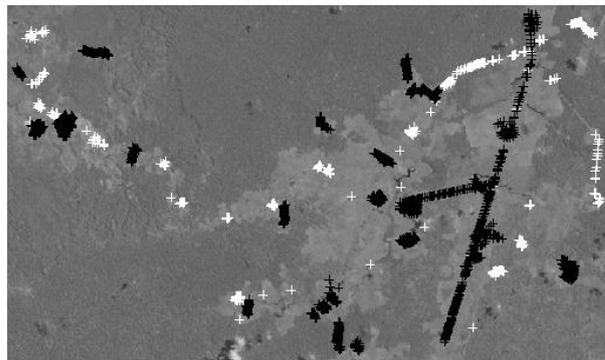


Fig. 3 - Imagem TM em tons de cinza com a localização dos pontos de controle medidos em campo.

#### 3.1.2 Dados SAR banda X e banda P

Os modelos digitais de elevação em banda X e banda P foram obtidos com o sistema Radar aerotransportado AeS-1 (*AeroSensing Radar Systeme GmbH*). O sistema 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  $45^\circ$  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 tem pixels com resolução em range de 1,5 e em azimuth de 0,7 m (1 look slant range). As imagens da banda X tem pixels com resolução em ground range de até 0,5 m.

### 3.1.3 Dados SAR banda C SRTM

O modelo digital de elevação em banda C foi obtido da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). A missão SRTM foi patrocinada pela NASA, JPL e NIMA com objetivo de obter dados globais de altimetria através de interferometria SAR. O sistema foi composto pela eletrônica do radar e por quatro antenas, uma antena banda C e uma banda X instaladas no corpo principal do ônibus espacial, e uma antena banda C e uma banda X montadas na extremidade de um mastro telescópico de 60 metros. A posição e orientação das antenas, necessários para interferometria, foi garantida por diversos instrumentos de forma a atingir os requisitos de 10 m para precisão relativa vertical e 15 m para precisão relativa horizontal. Descrições mais detalhadas da missão SRTM podem ser obtidas em SENUS (2000) e FARR e KOBICK (1999).

### 3.1.4 Dados LIDAR

Os dados LiDAR utilizados neste trabalho são parte de um projeto de videografia com objetivo de prover informações auxiliares para avaliação de imagens e métodos de sensoriamento remoto (HESS et al., 2002). Trata-se de um novo método para aquisição de dados da superfície da Terra que surgiu com o advento das câmeras de vídeo digitais de alta resolução. O método da videografia permite o levantamento de um grande volume de informações de alta resolução em um pequeno lapso de tempo e a um custo muito baixo. A videografia começou a ser empregada no Brasil através da cooperação entre o INPE, a Universidade de Santa Bárbara na Califórnia (UCSB), e o Laboratório de Propulsão a Jato (JPL). As características do vôo da videografia se assemelham às de um vôo fotogramétrico, portanto é viável a possibilidade da utilização das imagens e dados de videografia em atividades de cartografia. O sistema videográfico é composto pelos seguintes equipamentos: câmara de vídeo digital com lentes telefoto (zoom angle); câmara de vídeo digital com lentes grande angular (wide-angle); GPS diferencial com 12 canais operando em modo de tempo real; sistema para determinação da atitude do avião; perfilador Laser altímetro (LiDAR); gerador de código de tempo; gravador de código de tempo; e gravadores de vídeo digital. No presente trabalho estão sendo utilizados os dados de coordenadas tridimensionais do perfilador LiDAR que foram submetidos a algumas filtragens iniciais a fim de eliminar pontos com erros grosseiros decorrentes de falhas no sistema.

O LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma recente tecnologia para levantamento e mapeamento de recursos da Terra que permite a obtenção de dados altimétricos precisos, de alta resolução, em curto espaço de tempo e a custos competitivos. O uso dessa tecnologia integrada à produção de MDT constitui uma área de pesquisa bastante ativa e tem sido objeto de muitos estudos recentes. Todos os sistemas de laser medem a distância entre o sensor e o ponto iluminado no terreno. Um

típico sistema de LiDAR consiste de uma plataforma (helicóptero ou avião) e de um sensor de varredura laser que utiliza uma combinação de três diferentes tecnologias avançadas (BALTSAVIAS, 1999): 1) um Sistema de navegação inercial de alta precisão (Inertial Navigation System) para fornecer atitude e orientação da plataforma; 2) um localizador de distâncias laser; e 3) um Sistema de Posicionamento Global por satélite (GPS) usado no modo cinemático diferencial por fase para fornecer a posição do sensor. O receptor GPS, instalado na aeronave em relação ao centro elétrico do laser, opera no modo contínuo a uma certa taxa de gravação, esses dados GPS são pós processados em conjunto com dados GPS coletados na base instalada no ponto geodésico em terra. Quaisquer posições correspondentes a emissões contínuas de pulsos laser podem ser calculadas por interpolação a partir das posições cinemáticas GPS. Integrando os três subsistemas em um único instrumento montado no avião ou em um pequeno helicóptero, é possível adquirir rapidamente nuvens de pontos tridimensionais do terreno abaixo da trajetória de vôo. As medidas de distância são convertidas em coordenadas geográficas e elevações para cada pulso laser combinando os dados da distância medida com a informação da posição do avião no tempo e a direção em que o pulso do laser foi disparado em cada instante do levantamento de dados. A posição do avião durante todo o trajeto de vôo é gravada usando o sistema de posicionamento global diferencial. A direção do pulso do laser é estabelecida usando o sistema de navegação inercial (INS) capaz de medir a orientação do avião. Todos estes dispositivos devem ser precisamente sincronizados para se obter as leituras de todos os dispositivos ao mesmo tempo. Toda esta informação junto com os dados da calibração do sensor é processada para produzir os dados de pontos 3D geocodificados com coordenadas x, y, z em relação a um sistema de coordenadas cartográficas (WEHR e LOHR, 1999). Sensores LiDAR geralmente produzem dados superabundantes. Neste estudo centenas de milhares de pontos foram coletados, processados e analisados. Maiores informações sobre tecnologia LiDAR podem ser obtidos em BALTSAVIAS, 1999; WEHR e LOHR, 1999; DRAKE et al., 2002. A Figura 4 apresenta o modelo em banda X representado em tons de cinza com a totalidade das linhas LiDAR sobrepostas em cor branca. Alguns trechos dessas linhas serão efetivamente discutidos mais adiante no trabalho, integrando dados de todos os sensores e imagens de videografia (Figuras 12, 13 e 14).



Fig. 4 - Modelo InSAR da banda X em tons de cinza com dados LiDAR sobrepostos.

As imagens de videografia de alta resolução foram utilizadas principalmente para classificação visual das áreas de florestas, regenerações e pastos. Foram ainda, utilizados no trabalho mapas topográficos, imagens de radar e imagens LANDSAT/TM como dados complementares para fins de registros, seleção de amostras, fusão de imagens e classificação. A maior parte dos dados foi reamostrada para a grade regular de 2.5 m x 2.5 m.

### 3.2 Qualidade geométrica original

Com base nos princípios físicos teóricos aplicados na concepção e operação dos diferentes métodos de sensoriamento remoto utilizados neste ensaio, assim como nas características dos instrumentos e métodos de coleta dos dados de campo, partiu-se da hipótese de que as medidas de LIDAR e dos DEM em banda P, banda X e banda C (SRTM) devem produzir resultados de altitudes similares aos obtidos nas medidas topográficas de campo feitas sobre áreas descobertas tais como as estradas, campos arados, pastagens e solos descobertos. Descrições mais completas sobre princípios e aplicações de interferometria SAR que justificam esta hipótese podem ser consultadas em BALTZER (2001) e sobre sistemas LIDAR podem ser encontrados em WEHR e LOHR, 1999; DRAKE et al., 2002. Considerou-se também a hipótese de que todos os dados em estudo possuem coincidência de posição horizontal em qualquer situação, ou seja os dados estão georeferenciados horizontalmente e as discrepâncias que se pretende corrigir só ocorrem em termos de altitudes. Estas hipóteses simplificativas podem ser consideradas razoavelmente corretas, tendo em vista os princípios físicos, as características de imageamento dos sensores em estudo e a existência de um bom pré alinhamento horizontal de todos os conjuntos de dados confirmado através de análises numéricas simplificadas e reforçado pela comparação com imagens do espectro ótico da região de estudo. Assim, os testes e ajustes pretendidos foram feitos somente em termos de translação em altitude.

Por conta de diferentes sistemas geodésicos de referência utilizados na coleta dos dados por cada tipo de sensor, tornou-se necessário inicialmente que as

posições de todos os dados em estudo (banda X, banda P, banda C, LIDAR, GPS e Topografia) fossem transformadas para o sistema geodésico WGS84 a fim de garantir uma referência única e padronizada.

Sabe-se que as altitudes utilizadas para fins práticos devem ser referenciadas ao geóide, entretanto como a região não possui uma rede de medidas gravimétricas e de altitudes geométricas suficientemente densa e confiável optou-se pela utilização de altitudes elipsoidais, embora seja possível também utilizar modelos geoidais como o MAPGEO, disponibilizado pelo IBGE para fazer conversão. Entretanto, é conveniente destacar que este procedimento não afeta os resultados das análises e comparações, tendo em vista que todos os dados testados foram rigorosamente referenciados ao mesmo sistema.

Algumas avaliações preliminares com objetivo de verificar a qualidade geral dos dados originais feitas através de análises numéricas simplificadas, integração com imagens ópticas e comparações de perfis de superfícies, distribuídos espacialmente ao longo de toda a região contendo os valores altimétricos LiDAR, banda X, banda P e banda C mostraram bom pré-alinhamento horizontal, razoável coerência relativa entre os dados dos diferentes sensores, porém revelaram tanto a existência de vários *outliers* como a necessidade de calibração em alturas com diferentes valores para prover uma compatibilidade geral. Vários perfis analisados contendo dados de todos os sensores em regiões de pastagens e solos descobertos mostraram claramente estes problemas, apresentando discrepância em altura nos valores de todos os sensores em solo descoberto e a existência de *outliers*. Estes problemas se devem principalmente a algumas falhas ocorridas no sistema inercial da aeronave durante os vôos e, no caso da banda C SRTM, devido à sua resolução horizontal grosseira (90 metros) em relação aos outros sensores avaliados.

Assim, é necessário fazer a correção dos modelos para garantir melhoria da precisão e aumentar o potencial de aplicações onde um dos focos principais do trabalho é buscar respostas mais precisas para diversas perguntas importantes do ponto de vista prático tais como: Qual a exatidão global dos modelos? Como se relacionam os modelos com a superfície da cobertura do terreno e com o chão? Existem tendências de inclinação global em algum eixo ou direção? Existem erros globais ou erros locais significativos? Quais as possíveis causas dos erros? Qual a melhor forma de consertar os erros? Há também outras questões importantes a serem investigadas que serão abordadas no decorrer do trabalho.

### 3.3 Correção por translação em altitude

A quantificação dos erros e a correção dos dados dos diferentes sensores foi feita através da confrontação com a estrutura de pontos topográficos de campo considerados isentos de erros, devido a alta precisão dos métodos de levantamentos utilizados. Uma translação em altitude ótima foi determinada pela média das diferenças de altitude entre os pontos topográficos e

os pontos InSAR e LiDAR 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. No cálculo da correção foram feitos vários esforços interativos para eliminação dos *outliers* a fim chegar ao melhor resultado possível. A formulação matemática utilizada para o cálculo da translação em altitude ótima é dada por

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

e a precisão da translação em altitude (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, X, C ou LiDAR (DUTRA et al., 2002; TIMBÓ ELMIRO et al., 2003). A qualidade da correção foi monitorada em termos de análise das médias, desvios padrão, mínimos e máximos que foram usados para identificação e remoção de *outliers*.

### 3.3.1 Correção dos dados LiDAR

Para a correção dos dados LiDAR houve dificuldades de identificar uma quantidade razoável de pontos topográficos da estrutura de controle com a exata coincidência de posição em relação a pontos LiDAR, tendo em vista as diferentes características de amostragens do método de coleta dos pontos LiDAR e das medidas topográficas de campo. Assim, utilizou-se a estratégia de selecionar os pontos LiDAR numa vizinhança de 5 metros de pontos topográficos da estrutura de controle para determinar um valor médio de correção vertical adequado para correção dos dados LiDAR. Tomou-se o cuidado de evitar vizinhanças em relevos movimentados para obtenção de valores mais consistentes. Como os dados LiDAR e dados topográficos foram adquiridos em diferentes épocas e a região apresenta uma dinâmica de paisagem muito intensa tomou-se, também, o cuidado de utilizar somente os pontos coincidentes situados em áreas onde não havia cobertura vegetal no ano de 1999, época da coleta de dados LiDAR. A correção final produziu um valor médio de -0,9 metros para os dados LiDAR, com um desvio padrão de 2 m. Significando que os dados LiDAR originais estão deslocados de 0,9 metros para cima.

Analisando detalhadamente as altitudes LiDAR nas proximidades dos cruzamentos das diferentes linhas de vôo (ver Figura 4) foram observadas algumas inconsistências que merecem comentários. Os pontos de cruzamentos de linhas fisicamente muito próximos deveriam ter altitudes muito similares, mas foram encontradas diferenças em alguns trechos. Eventualmente este problema pode estar sendo causado por estreitos buracos entre árvores, mas como algumas discrepâncias menores também foram registradas em

áreas de regenerações, isto pode sugerir que uma calibração mais adequada deveria ser feita por linhas ou por trechos de linhas LiDAR em vez de uma calibração geral.

### 3.3.2 Correção dos dados InSAR

Os fatores de correção em altitude dos dados InSAR (Bandas P, X e C SRTM) foram determinados através da confrontação com o conjunto de pontos topográficos de campo da estrutura de controle. Os modelos X, P e C apresentaram valores de correção de -3,49m, -3,27m e 2,55 m respectivamente. De forma similar ao caso do LiDAR, 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 qualidade da correção e o controle de *outliers* foram monitorados em termos de análise dos desvios padrão, mínimos e máximos. A Tabela 1 mostra os deslocamentos altimétricos e desvios padrões em relação ao controle topográfico.

TABELA 1: VALORES DE CORREÇÃO PARA OS DIFERENTES SENSORES (metros)

Sensor	Translação em altitude	Desvio Padrão
Banda P	-3,49	3,04
Banda X	-1,27	3,60
Banda C	2,55	4,49
LiDAR	-0,90	2,30

Os valores de correção por translação em altitude foram então somados algebricamente aos modelos InSAR e aos dados LiDAR para sua utilização nas etapas subseqüentes. Sabe-se que, a rigor, os problemas nos modelos InSAR discutidos anteriormente provocam erros nos três eixos coordenados e não somente na altitude, portanto, algumas transformações mais abrangentes, baseadas em modelos não rígidos, estão sendo pesquisadas para trabalhos futuros.

### 3.4 Avaliação dos modelos ajustados

Após a correção da translação em altitude dos modelos InSAR e dos dados LiDAR eles foram submetidos a algumas avaliações. Os dados LiDAR originais representam centenas de milhares de amostras, e em varias análises do problema tornou-se necessário filtrar os dados espacialmente para selecionar amostras com espaçamento regular entre pontos. Devido às características de alta frequência dos pulsos e ao estreito IFOV que proporciona fina resolução com capacidade de penetração de pulsos estreitos nos buracos da floresta, os dados de perfilamento LiDAR, mediante alguns processamentos, são capazes de fornecer respostas do topo e do chão da floresta (WEHR e LOHR, 1999; DRAKE et al., 2002). A fim de fazer uso dessas capacidades do LiDAR para auxiliar na avaliação dos modelos InSAR, foram desenvolvidos processamentos de filtragens baseados em valores máximos, valores mínimos, valores de médias e valores de medianas aplicados aos dados LiDAR corrigidos por

translação em altitude para obter alturas do topo, da base e de outros níveis da floresta.

A Figura 5 mostra um perfil com dados de todos os sensores após a correção por translação em altitude (em cima) e a imagem da videografia de alta resolução (em baixo). Os dados da Figura 5 estão filtrados com intervalo horizontal de 50 metros para permitir melhor visualização. Neste caso, a cada intervalo de 50 metros foram extraídos valores baseados em máximo (Lmax), mínimo (Lmin) e média (Lmed) das altitudes LiDAR corrigidas e em seguida calculadas as medidas correspondentes às altitudes em banda X, em banda P e em banda C SRTM nos modelos InSAR corrigidos. É possível observar visualmente a melhoria dos resultados, comprovada numericamente. Nota-se principalmente a aproximação dos valores de todos os sensores em áreas desmatadas e comportamento relativamente compatível com o que se espera nas áreas de regeneração e florestas.

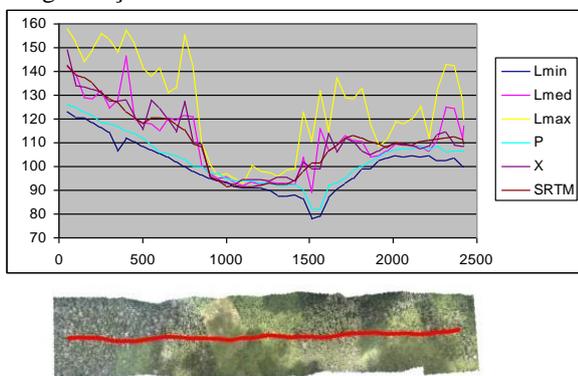


Fig. 5 - Perfis de LiDAR (mínimo, média e máximo) e InSAR após calibração por translação em altitude.

### 3.4.1 Avaliação em diferentes tipos de coberturas

A avaliação numérica dos modelos InSAR e dados LiDAR foi feita através de testes comparativos com um subconjunto de pontos precisos da estrutura de controle topográfica, localizados tanto em áreas de solos descobertos como em áreas com coberturas de florestas e regenerações. O objetivo desta avaliação é verificar a coerência geral, qualidade geométrica, necessidade de outras melhorias adicionais e a capacidade de fornecer respostas a várias questões importantes. Os pontos precisos da estrutura de controle topográfica para esta etapa foram distribuídos em quinze parcelas: seis parcelas com cobertura de florestas, quatro parcelas com cobertura de regeneração e cinco parcelas com cobertura de pastagens baixas e solos descobertos. A Tabela 2 mostra a síntese dos resultados mais importantes fornecidos em termos da média ( $\mu$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ), máximos (M) e mínimos (m).

TABELA 2: COMPARAÇÃO GERAL DAS DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS DOS SENSORES

	Floresta	Regeneração	Pasto
Topografia & Banda P	$\mu= 0.7$ $\sigma= 2.7$ M=16.0	$\mu= -0.3$ $\sigma= 2.7$ M=9.1	$\mu= 0.0$ $\sigma= 3.0$ M=23.1

	m= -10.3 $\mu= -10.2$ $\sigma= 9.6$ M=2.59 m= -32.3	M= -5.9 $\mu= -2.9$ $\sigma= 6.4$ M=3.2 M= -28.9	m= -16.5 $\mu= 0.0$ $\sigma= 3.6$ M=13.67 m= -30.5
Topografia & SRTM	$\mu= -9.9$ $\sigma= 8.2$ M=11.5 m= -25.3	$\mu= -3.0$ $\sigma= 5.5$ M=5.9 M= -19.8	$\mu= 0.0$ $\sigma= 4.5$ M=15.9 m= -22.6
BandaP & LIDAR Min	$\mu= 0.7$ $\sigma= 4.6$ M= 46.0 m= -18.8	$\mu= 1.6$ $\sigma= 2.9$ M=14.8 M= -12.4	$\mu= -0.1$ $\sigma= 2.6$ M=10.8 m= -7.0
BandaX & SRTM	$\mu= -0.6$ $\sigma= 6.6$ M=48.9 m= -21.4	$\mu= -0.2$ $\sigma= 3.5$ M=12.0 M= -10.5	$\mu= -0.8$ $\sigma= 2.0$ M=7.0 m= -11.5
SRTM & LIDARMax	$\mu= -17.8$ $\sigma= 9.1$ M=8.6 m= -66.7	$\mu= -13.9$ $\sigma= 7.9$ M=0.7 M= -39.9	$\mu= -6.4$ $\sigma= 4.3$ M=2.9 m= -43.6
BandaX & BandaP	$\mu= 15.3$ $\sigma= 7.1$ M=34.7 m= -23.2	$\mu= 6.3$ $\sigma= 6.9$ M=24.8 M= -6.2	$\mu= 1.6$ $\sigma= 2.9$ M=12.8 M= -4.8
SRTM & BandaP	$\mu= 15.9$ $\sigma= 7.1$ M=32.0 m= -38.3	$\mu= 6.5$ $\sigma= 6.6$ M=29.2 m= -6.1	$\mu= 0.8$ $\sigma= 2.7$ M=8.2 M= -6.7
BandaX & LIDARMin	$\mu= 15.9$ $\sigma= 6.4$ M=33.6 m= -11.1	$\mu= 7.9$ $\sigma= 6.7$ M=27.6 m= -4.5	$\mu= 1.5$ $\sigma= 2.5$ M=9.7 M= -4.7

A análise da Tabela 2 permite inferir algumas conclusões sobre a qualidade das correções aplicadas aos dados originais dos diferentes sensores em estudo e também será fonte importante no fornecimento de subsídios para responder a algumas das questões importantes sobre o desempenho desses sensores que ainda estão sem respostas definitivas. Estas considerações terão uma discussão mais completa em conjunto com o próximo tópico de avaliação.

### 3.4.2 Teste de tendências globais de inclinação

Para consolidar o processo de avaliação dos modelos corrigidos foi feita outra análise importante para atestar a qualidade dos modelos e garantir melhor precisão das respostas buscadas. Esta avaliação 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 ajustados. Para este propósito foram selecionados 57 pequenos grupos de pontos extraídos da estrutura de controle topográfica distribuídos na área de estudo. Os testes foram aplicados a cada um dos modelos X, P e C (SRTM) de modo que em cada um dos grupos de pontos topográficos foi calculado um valor de erro médio altimétrico. Os erros resultantes foram submetidos a um modelo de ajuste

linear do tipo  $y = A + Bx$  para ambos os eixos coordenados  $X$  e  $Y$  separadamente. De acordo com a Tabela 3, resultaram coeficientes de inclinação ( $B$ ) muito pequenos para todos os modelos.

TABELA 3: COEFICIENTES DA REGRESSÃO LINEAR AJUSTADA AOS 57 GRUPOS DE ERROS

	P	X	SRTM
EixoX			
A	-0.266109	-0.859688	-0.626802
B	0.00000495582	-0.00002414	-0.00010859
EixoY			
A	1.63693	-3.35497	-4.19676
B	-0.000276597	0.000330634	0.000338581

Os erros médios de cada grupo de pontos para os modelos InSAR nas bandas P, X e C, respectivamente são ilustrados através de uma representação por símbolos proporcionais ao seu valor nas Figuras 6, 7 e 8.

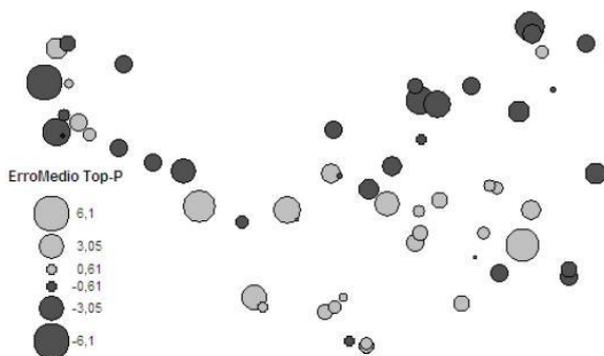


Fig. 6 – Erros de avaliação do modelo P.

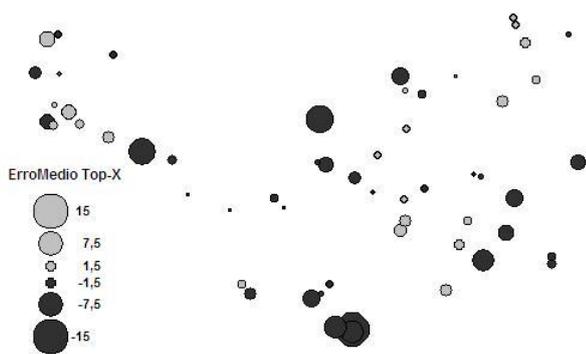


Fig. 7 – Erros de avaliação do modelo X.

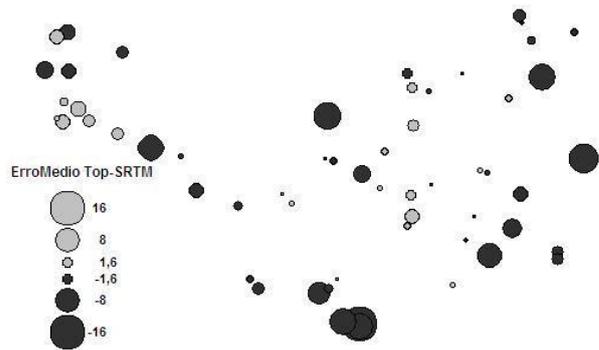


Fig. 8 – Erros de avaliação do modelo C SRTM.

Uma análise geral e integrada das Tabelas 2 e 3, e das Figuras 6, 7 e 8, associadas ao conhecimento de fatores envolvidos no imageamento InSAR permitem destacar algumas indicações importantes.

1. Não existem tendências globais de inclinação em nenhum dos modelos, conforme resultados da Tabela 3 que aponta coeficientes de inclinação insignificantes nas regressões lineares em torno dos eixos coordenados. As Figuras 6, 7 e 8 também reforçam esta tese devido à variação bastante irregular e não tendenciosa dos erros.
2. Pela observação das Figuras 6, 7 e 8 nota-se uma sucessão de picos e vales característicos de erros tipicamente locais de valores variáveis, indicando a necessidade de correção por métodos mais aprimorados para os modelos InSAR.
3. Os dados da Tabela 2 apontam resultados razoavelmente consistentes com o que se espera teoricamente dos sensores e indicam que a correção foi importante para a sua obtenção, chamando atenção para algumas pequenas inconsistências listadas a seguir a serem posteriormente investigadas.
4. Analisando perfis individuais com dados dos múltiplos sensores, em vários lugares a banda X passou por baixo da Banda P.
5. Analisando a coluna Topografia&BandaP da Tabela 2 na linha de florestas, observa-se que os resultados do modelo em banda P se aproximou bastante da topografia, mas ainda ficou quase 1 m acima e os valores elevados para os máximos e mínimos indicam que ainda podem existir *outliers*.
6. Analisando a coluna BandaP&LidarMin da Tabela 2, na linha de regenerações onde a banda P fica 1.6 m acima do mínimo do LIDAR, observa-se que os resultados indicam uma pequena inconsistência.
7. O SRTM ficou um pouco acima da banda X em florestas, regenerações e solos descobertos o que também foge um pouco do esperado.

Uma hipótese que pode ser admitida para a ocorrência dos erros tipicamente locais após a correção global por translação em altitude, além de outras incoerências encontradas é de que os erros sejam provavelmente devidos: ao processo de mosaicagem das

faixas de vôo; a problemas no processamento InSAR; a falhas no sistema de navegação; a calibração de fase de cada imagem; e também outros fatores como movimentos da vegetação e mistura do solo nu com vegetações pelo efeito da visada lateral do radar. Esses erros locais caracterizam um serpenteamento artificial do modelo que funciona como se fossem movimentos de feições particulares da cena imageada que sugerem a aplicação, não somente de correções globais, mas também de correções locais baseadas em transformações não rígidas que permitem maior liberdade de correção. Os dados da Tabela 2 mostram que uma simples correção por translação em altitude já produziu bons resultados, mas importantes melhorias podem ser acrescentadas através de correções por modelos não rígidos baseados em splines e polinômios fragmentados que serão realizados em futuros estudos.

### 3.5 Estruturas da floresta

Os sistemas LiDAR aerotransportados oferecem excelentes oportunidades para determinação de propriedades biofísicas de regiões de florestas a partir da análise da informação 3D detalhada do dossel recuperada dos dados laser. Diferentes tipos de florestas podem ser caracterizadas pelos seus histogramas da distribuição de alturas. Assim, foram criados gráficos da distribuição de alturas em vários trechos de florestas, regeneração e pastagens utilizando os dados LiDAR corrigidos. Seis trechos de florestas quatro de regeneração e cinco de pastagens foram utilizados para este propósito. Histogramas de distribuição de alturas foram produzidos em cada trecho de floresta, de regeneração e de pastagens, inicialmente em pequenas parcelas de 100 em 100 metros. Analisando os histogramas das pequenas parcelas verificou-se que resultados mais consistentes poderiam ser obtidos extraindo a média de vários pedaços consecutivos de 100 metros contidos em cada trecho individual. Cada tipo de cobertura florestal possui, assim, um histograma diferenciado que permite caracterizá-la com razoável precisão, auxiliando bastante na classificação de coberturas florestais. A Figura 9 ilustra duas amostras de distribuição de alturas para trechos de floresta e regeneração obtidas por este processo. O eixo X representa a altura das árvores e o eixo Y a contagem de medidas LiDAR.

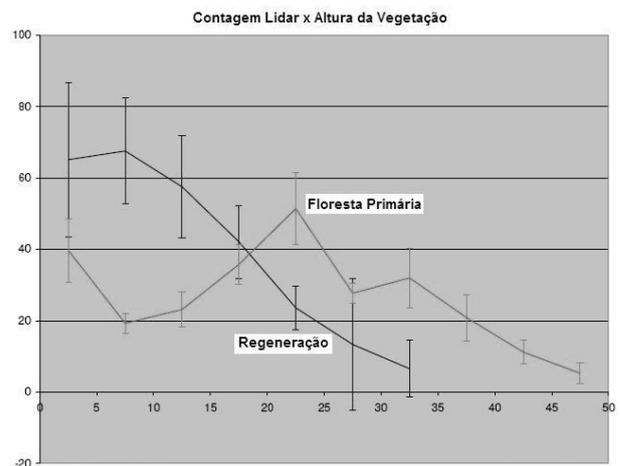


Fig. 9 – Distribuição de alturas para trechos de floresta e regeneração.

Pela análise dos dados obtidos de distribuição de alturas de florestas é possível observar uma diferenciação entre as estruturas dos diferentes tipos de florestas, estes dados podem ser muito importantes para auxiliar na determinação de propriedades biofísicas da floresta tais como altura média das árvores, volume da mata e área basal.

### 3.6 Modelos digitais de alturas da floresta

A determinação de alturas e o cálculo de volumes florestais é um importante campo de aplicação que pode se beneficiar da utilização dos dados de diferentes sensores em regiões de florestas. A diferença entre os modelos de elevação produzidos pelas bandas X e banda P ( $MDE(\text{banda X}) - MDE(\text{banda P})$ ) representa um modelo digital de altura da floresta (MDA). A Figura 10 mostra o MDA representado em tons de cinza obtido a partir dos modelos X e P corrigidos. As linhas sobrepostas em cor branca representam vários trechos com disponibilidade de dados LiDAR e imagens de videografia selecionados para análise de perfis e outras avaliações. No presente estudo, para testar a exatidão da altura da floresta, determinada pelo método do MDA, foram medidos vários transectos de 10 m x 250 m em áreas de teste cuidadosamente selecionadas, onde foram determinadas as alturas de diversas árvores utilizando métodos de engenharia florestal. A comparação das medidas de campo com as medidas obtidas pela diferença dos MDE da banda X e MDE da banda P apontaram resultados coerentes. A Tabela 4 mostra alguns resultados gerais em termos da média e desvio padrão das diferenças entre os dados dos modelos e dados das medidas de campo realizadas em vários transectos. Na Tabela 4 o termo DEM\_P-Topo representa a diferença entre o modelo P e dados de topografia, o termo EngFI-MDA representa a diferença entre altura das árvores medidas por métodos de engenharia florestal e alturas medidas pelo MDA.

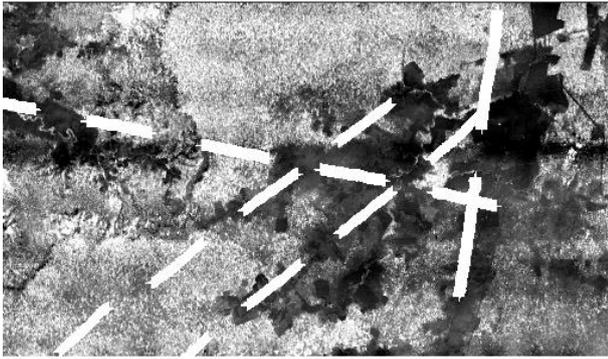


Fig. 10 – Modelo digital de altura da floresta (MDA) com perfis LIDAR sobrepostos em branco.

TABELA 4: DIFERENÇAS ENTRE OS DADOS DOS MODELOS E DADOS DAS MEDIDAS DE CAMPO

	DEM_P-Topo	EngFI-MDA
Medida (m)	-0.3	-3.0
Desvio Padrão ( m)	0.8	5.0

O gráfico mostrado na Figura 11 ilustra uma vista de perfil de um dos trechos utilizados para teste do MDA. Corresponde a uma área de floresta primária com pequenos trechos de regeneração no início e no final. Neste trecho foi feito um caminhamento topográfico sob a mata com estação eletrônica e tiradas as medidas das alturas das árvores utilizando técnicas convencionais de engenharia florestal.

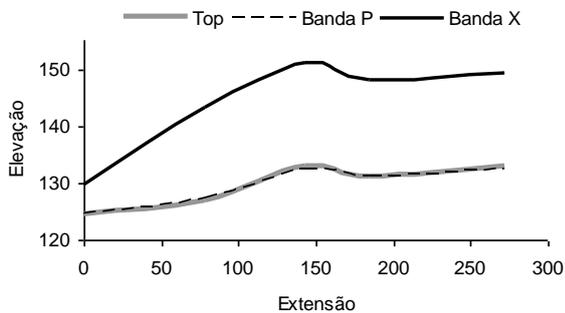


Fig. 11 – Comparação entre Topografia, DEM P e DEM X em trecho de floresta e regeneração.

### 3.7 Perfis dos sensores e imagens de videografia

As imagens de videografia de alta resolução obtidas em conjunto com os dados LiDAR constituem uma excelente fonte auxiliar para avaliação visual da qualidade dos dados, além de servirem de base para análises numéricas simplificadas. Foram produzidos diversos perfis contendo os dados de todos os sensores em estudo junto com as imagens de videografia de alta resolução correspondentes a cada trecho. Alguns perfis representando trechos importantes são mostrados nas figuras 12, 13 e 14. Na parte inferior das figuras 12, 13 e 14 podem ser vistas as imagens de videografia dos trechos de floresta, regeneração e desmatamentos com uma faixa central indicando a projeção dos perfis no terreno. Na parte superior aparecem os perfis

correspondentes, contendo os valores de todos os sensores. As linhas mostradas em cada perfil representam as medidas de altitudes obtidas pelos diferentes processos, ou seja, LiDAR filtrado com base em valores máximos, LiDAR filtrado com base em valores mínimos, LiDAR filtrado com base em valores médios, DEM banda P, DEM banda X e DEM banda C SRTM. A Figura 12 mostra os perfis e a imagem de videografia relativos a uma parcela de floresta primária. A faixa verde no centro da imagem corresponde à projeção dos perfis no terreno. Pode-se observar os valores banda P e LiDAR mínimo próximos e ocupando os níveis mais baixos, banda X, banda C SRTM e LiDAR média próximos e nos níveis intermediários e LiDAR máximo se destacando no nível mais alto. As diferenças entre os níveis são bastante acentuadas indicando floresta de grande porte, permitindo inferir informações importantes sobre sua estrutura.

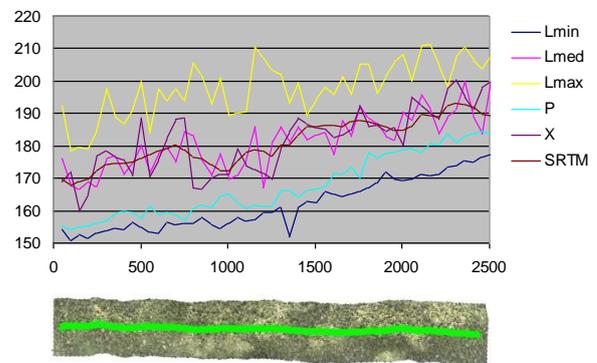


Fig. 12 – Perfis e videografia em região de floresta primária.

A Figura 13 contém os perfis e a imagem de videografia relativos a uma parcela de regeneração média com alguns trechos semi desmatados. A faixa azul no centro da imagem corresponde à projeção dos perfis no terreno. Nesta Figura 13, tal como na Figura 12 pode-se observar os valores banda P e LiDAR mínimo muito próximos e nos níveis mais baixos, banda X, SRTM e LiDAR média próximos e nos níveis intermediários e LiDAR máximo no nível mais alto, entretanto as diferenças entre os níveis são menores indicando regenerações de diferentes idades. Em alguns trechos semi desmatados (lado direito) as diferenças são bem pequenas.

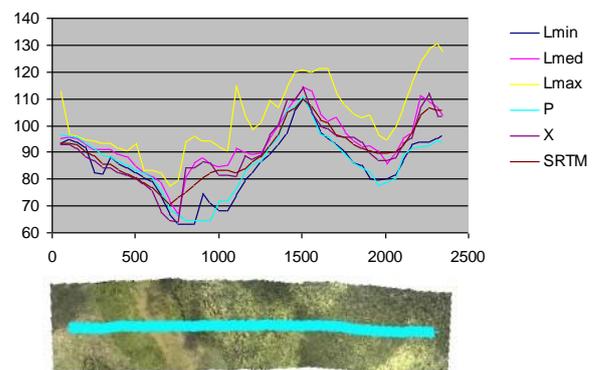


Fig. 13 – Perfis e videografia em região de regeneração com diferentes idades.

A Figura 14 contém os perfis e a imagem de videografia relativos a uma parcela onde predominam desmatamentos, pastagens e regenerações novas. A faixa vermelha no centro da imagem corresponde à projeção dos perfis no terreno. Pode-se observar os valores de todos os sensores muito próximos com as diferenças aumentado apenas onde existe alguma presença de regeneração.

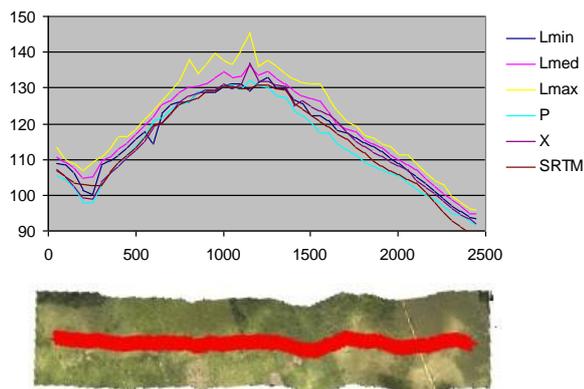


Fig. 14 – Perfis e videografia em áreas onde predominam desmatamentos e pastagens.

Em todos os gráficos analisados são observadas algumas pequenas incompatibilidades em trechos localizados que ainda devem ser investigadas em futuros estudos. No geral, porém, são observados resultados relativamente coerentes com os princípios teóricos consolidados. A teoria geral sugere que em condições normais a linha LiDAR com filtro de mínimo seria a mais baixa de todas, seguida em ordem crescente pelas linhas banda P, SRTM, LiDAR com filtro de média, banda X e LiDAR com filtro de máximo. Em terrenos descobertos todas as linhas teriam a mesma altura. Existem, porém, interações complexas entre várias condições que podem interferir nesta ordem e, portanto alguns valores obtidos e apresentados nas Figuras 12, 13 e 14 podem contrariar a lógica teórica em alguns trechos, tanto nas áreas de florestas como na regeneração e áreas descobertas. As causas dessas inconsistências podem ser justificadas, dentre outros pelos argumentos que seguem. A resolução original dos diversos sensores são diferentes e os de maior resolução podem coletar picos de altos e baixos atravessando a linha dos sensores de menor resolução que tende a ser mais suavizada. Outra possibilidade sugere que em casos específicos pode estar ocorrendo penetração no solo da radiação em banda P, mesmo sob cobertura florestal. Na média, entretanto, as análises mostram valores afinados com a lógica esperada como pode ser observado quando o valor da banda X está sempre acima da banda P, o LiDAR do topo mostra os picos mais altos e o do chão mostra os mais baixos. Estes resultados preliminares já permitem indicar ótimas possibilidades de obtenção de mapeamento altimétrico em regiões de florestas. Entretanto, não é seguro fazer

afirmativas conclusivas em relação à generalização destes resultados devido a incertezas e imprecisões que podem ocorrer em diferentes etapas do processo. No caso das medidas de campo das alturas da cobertura vegetal, devido a algumas dificuldades e imprecisões relacionadas à definição dos pontos exatos do topo da folhagem da árvore a ser medido no campo para fins de comparação, tendo em vista que o pixel do DEM banda X representa a resposta média de uma amostra de 6.25 m<sup>2</sup> do topo da floresta, os resultados não podem ser inteiramente conclusivos. Conclusões mais seguras requerem a necessidade de futuros refinamentos nas medidas de campo e no tratamento dos dados.

#### 4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Correção de modelos altimétricos obtidos através de interferometria SAR multifrequência e dados de perfilamento LiDAR é assunto que ainda envolve tecnologias da fronteira do conhecimento, portanto conclusões e afirmações seguras e definitivas, principalmente nos ambientes de florestas tropicais ainda são objeto de estudos e investigações preliminares. Os resultados do presente trabalho, entretanto, permitem vislumbrar um grande potencial de aplicações no mapeamento altimétrico de vastas regiões amazônicas cuja topografia detalhada permanece até hoje desconhecida, constituindo um severo obstáculo para o desenvolvimento da região. É também possível vislumbrar que as aplicações dessa tecnologia poderão ser potencialmente estendidas a outras áreas territoriais que apresentam densa cobertura florestal, o que tem sido até o presente momento uma grande dificuldade para a representação precisa do relevo através do método da fotogrametria. Outra importante aplicação potencial das tecnologias pesquisadas no presente trabalho é na determinação de alturas da cobertura florestal e na avaliação de volumes da biomassa. No presente trabalho foi possível concluir principalmente que os modelos de elevação produzidos pelas novas tecnologias podem trazer razoável precisão global tendendo a apresentar erros localizados. Assim, é muito importante que hajam fases intermediárias de avaliação de correção de erros antes de sua utilização em outras aplicações. A degradação encontrada nos modelos da área de estudo é compreensível e explicável em virtude da quantidade e complexidade das variáveis que interagem no processo de coleta e tratamento dos dados interferométricos e LiDAR. Nem todos os erros devidos à plataforma, à geometria da coleta dos dados e à interação eletrônica ao longo do processo de formação dos modelos finais podem ser completamente corrigidos por métodos determinísticos baseados no caminho inverso e teórico da coleta dos dados. Quanto às questões importantes, ainda sem respostas definitivas formuladas nos objetivos deste trabalho, os dados da Tabela 2 mostraram algumas evidências que permitem tirar algumas conclusões e fazer alguns comentários importantes em relação à situação específica do presente estudo.

1. A radiação da banda P penetra até o nível do solo com igual facilidade em qualquer tipo de cobertura? Pela análise da Tabela 2 a radiação em banda P retorna ao atingir solos descobertos ( $\mu= 0$ ), um pouco acima nas regenerações ( $\mu= 0.3$ ) e mais acima ainda em florestas densas ( $\mu= 0.7$ ) e quanto mais densa a floresta mais alto o ponto de retorno.
2. A radiação da banda X retorna ao encontrar o topo das copas das árvores com qualquer densidade da folhagem? Nos perfis analisados, salvo algumas incoerências a serem investigadas em trabalhos futuros, o valor banda X ficou sempre acima da Banda P. Na comparação com a medida de árvores coletadas no campo as discrepâncias observadas foram relativamente pequenas. Cabe observar que a altura no modelo em banda X refere se à média de uma área de 2.5m x 2.5m, enquanto o método de medidas de árvores no campo é pontual, empírico e sujeito a alguns erros.
3. O SRTM (banda C) penetra mais que a banda X? Os perfis analisados mostraram uma penetração ligeiramente superior ficando a banda C entre a banda X e banda P. Entretanto, há vários trechos não concordantes que devem ser melhor investigados e que podem ser explicados em parte pela diferença de resolução entre as duas bandas.
4. É possível extrair altitude do chão e o topo da mata a partir dos dados LiDAR? Alguns trechos analisados apresentaram conflitos, mas em media esta possibilidade foi confirmada. Um filtro com base na extração de valores de máximos LiDAR em intervalos apropriados consegue capturar a representação do topo e filtros baseados em mínimos conseguem capturar a representação do chão.
5. A resposta do chão do LiDAR é compatível com a resposta da banda P? Apesar de haver alguns resultados discordantes, no geral os perfis analisados mostraram coerência, indicando mínimos de LiDAR ligeiramente abaixo da banda P, o que pode ser explicado devido ao LiDAR capturar medidas pontuais de buracos da floresta e a altura no modelo P refere se a média das alturas do solo em uma área de 2.5m x 2.5m acrescida de um certo volume de floresta de acordo com a sua densidade.
6. A resposta do topo do LiDAR é compatível com a resposta da banda X? Os perfis analisados mostraram coerência neste aspecto indicando que os topos LiDAR estão ligeiramente acima da banda X o que ocorre devido ao LiDAR capturar medidas pontuais e a altura no modelo X refere se a média das alturas em uma área de 2.5m x 2.5m.
7. O que é possível fazer para melhorar a confiança de modelos InSAR de forma que possam ser usados em aplicações produtivas? Avaliações quanto aos tipos de erros que podem estar ocorrendo nos dados tais como as realizadas neste trabalho indicando que os modelos possuem bom registro horizontal, não incorporam tendências globais de inclinação,

possuem picos e vales característicos de erros locais são importantes para determinar os procedimentos adequados de correção. A utilização de referências de controle confiáveis como pontos de controle de terreno e algoritmos adequados para correção, em geral melhoram a qualidade dos modelos. Esta qualidade deve ser comprovada através de medidas estatísticas que devem acompanhar os modelos em análises posteriores.

Para refinamento de resultados e garantia de conclusões mais consistentes, sugere se que em futuros trabalhos sejam utilizados também os dados de outros sensores adquiridos na região como a banda X SRTM de resolução melhor que a banda C SRTM. De acordo com experimentos já planejados estes dados altimétricos da região serão utilizados para futuros trabalhos que envolvem a determinação de volume de florestas e o calculo de biomassa. Assim, é muito útil que se continue a investir na melhoria da correção dos modelos e dentro dessa linha sugere se investir em métodos de correção baseados em transformações não rígidas através de polinômios fragmentados, splines e modelos deformáveis.

Procedimentos para avaliar e corrigir modelos tridimensionais derivados de interferometria SAR multifrequência e dados LiDAR nos moldes realizados neste trabalho podem ser uma 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. Os métodos tradicionais, atualmente utilizados, são de alto custo, morosos, inadequados para grandes extensões e sujeitos a interferência de obstáculos que podem inviabilizar muitos projetos.

## 5 FUTUROS TRABALHOS

Além das recomendações sugeridas no tópico anterior, futuros estudos já estão sendo encaminhados pelos autores visando ao desenvolvimento de algoritmos avançados para correção de modelos digitais de elevação através de transformações não rígidas baseadas em splines, polinômios fragmentados e superfícies deformáveis que têm sido muito utilizados em visão computacional e processamento de imagens médicas, entretanto não há trabalhos relacionados a modelagem digital de terrenos. Os algoritmos irão utilizar feições lineares, feições estatísticas e feições superficiais baseadas em medidas de campo para correção dos modelos. É também objetivo dos autores utilizar pontos de controle 3D, integrando as imagens de magnitude e os DEM InSAR para identificação precisa dos pontos e aplicar transformações com diferentes graus de liberdade tanto para avaliar precisão quanto para melhorar a qualidade geométrica global dos modelos altimétricos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other Resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 164–198, 1999.

BALTZER, H. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (Insar). **Progress in Physical Geography**. 25, 2 pp. 159-177, 2001.

CROSETTO, M.; ARAGUES, F. P. **Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation: validation and data fusion**. Barcelona - Spain: Institut Cartografic de Catalunya, 1999.

DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; Clark, D. B.; G. Knox, R. G.; Blair, J. B.; Hofton, M. A.; Chazdon, R. L.; Weishampel, J. F.; Prince, S. D. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 305–319, 2002.

DUTRA, L.V.; TIMBÓ ELMIRO, M.; MURA, J.C.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; SOARES-FILHO, B.S. ARAUJO, L.S.; ALBUQUEQUE, 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.

FARR, T.G. e KOBRICK, M. Mapping the World in 3-D: The Shuttle Radar Topography Mission, Pecoral4 Landsatellite Information III. **Proceedings**. Denver, CO, December 1999.

FREITAS, C.C.; SANT'ANNA, S.J.S.; SOLER, L.S.; SANTOS, J.R.; DUTRA, L.V.; ARAÚJO, L.S.; MURA, J.C.; HERNANDEZ FILHO, P. The use of airborne P-band radar data for land use and land cover mapping in Brazilian Amazonia. 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].

HESS, L. L.; NOVO, E. M. L. M.; SLAYMAKER, D. M.; HOLT, J.; STEFFEN, C.; VALERIANO, D. M.; MERTES, L. A. K.; KRUG, T.; MELACK, J. M.; GASTIL, M.; HOLMES, C.; HAYWARD, C. Geocoded digital videography for validation of land cover mapping in the Amazon basin. **International Journal of Remote Sensing**, 2002, vol. 23, no. 7, 1527–1556.

HOFMANN, C.; SCHWÄBISH, 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, Comission 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

SANTOS, J.R.; ARAÚJO, L.S.; FREITAS, C.C.; SANT'ANNA, S.J.S.; DUTRA, L.V.; HERNANDEZ FILHO, P. Biomass forest inventory in the Brazilian Amazônia: local approach using microwave (p band) airborne 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.

SENUM, W.J. Global Mapping Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 4th Global Spatial Data Infrastructure Conference. **Proceedings**. Cape Town, South Africa, March 2000.

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.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68–82, 1999.