

Metodologia da Aquisição de Dados Radargramétricos do Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco

FÁBIO FURLAN GAMA¹

JOSÉ CLAUDIO MURA¹

EUGÊNIO SPER DE ALMEIDA²

PAULO C. G. DE ALBUQUERQUER¹

LEONARDO BINS¹

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Caixa Postal 515 - 12201-097 - São José dos Campos - SP, Brasil

²INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Rodovia Pres, Dutra, Km 40 - 12630-000 – Cachoeira Paulista - SP, Brasil

fabio@dpi.inpe.br

mura@dpi.inpe.br

eugenio@cptec.inpe.br

gurgel@ltid.inpe.br

leonardo@inpe.br

Abstract: This paper describes the methodology used to obtain the radar data collected during the São Francisco Project campaign. The airborne interferometry X-band SAR of high resolution AeS-1 is configured with a dual antenna with the following characteristics: operation frequency of 9.6GHz, bandwidth of 400MHz, 1.8m of baseline, imaging range up to 14 km, horizontal resolution of 0.5 m and height precision up to 5 cm. The data acquisition was composed of a ground and flight segment. During the flight, segment antennas, transmitters, receivers, on-board computer and flight control systems were used. High precision GPS stations and computers for flight planning and data transcriptions were used for the ground segment. Raw radargrametry data and navigation data were obtained as results of this campaign.

Keywords: radar, remote sensing, interferometry.

1 Introdução

Com a finalidade de atender o Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco, o INPE conduziu um estudo, para selecionar as tecnologias e processos de mapeamento, no sentido de viabilizar em tempo e custo, a realização deste trabalho, incluindo desde os levantamentos geodésicos, cobertura aérea e as respectivas traduções cartográficas na forma de ortoimagens, com qualidade e precisão exigidas pelo projeto.

As áreas para o mapeamento compreenderam quatro estados do Nordeste, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, totalizando 10000 Km² de área e uma extensão de ~ 2000 Km, a **figura 1** apresenta a disposição das áreas e a denominação das mesmas.

A distribuição espacial das áreas e a suas extensões foram definidas pelos técnicos do Ministério do Planejamento e Orçamento, extinto MPO, e após o mapeamento seriam geradas cartas de setores, de forma a cobrir as áreas dos canais. O objetivo foi a elaboração de documentos cartográficos, topográficos na escala de 1/5000 da região, para atender o estudo de viabilidade deste projeto no menor prazo possível.

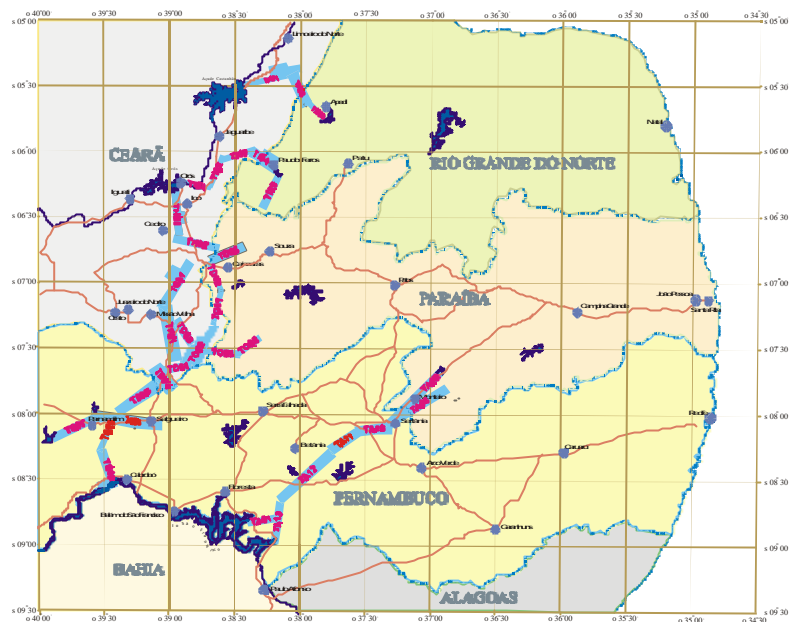


Figura 1 – Áreas Mapeadas.

A escolha das alternativas analisadas, que atendiam as restrições pertinentes a prazos, custos e especificações técnicas, conduziu a utilização de um Radar de Abertura Sintética Interferométrico, de alta resolução, para geração dos produtos cartográficos especificados.

Basicamente um Radar de Abertura Sintética Interferométrico consiste de um radar imageador, que possui um par de antenas que permite obter duas imagens do mesmo alvo e por meio de processamento digital, obter uma terceira imagem complexa, cuja fase de cada pixel, é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes às duas imagens originais. A fase de cada pixel da imagem resultante, ou “imagem interferométrica”, está relacionada com a elevação do terreno correspondente à célula de resolução no solo, possibilitando com isso a geração de um Modelo Numérico de Terreno (MNT).

2 Conceito básico de interferometria

A primeira medida de elevação na Terra, obtida por interferometria de imagens de radar aerotransportado, foi realizada em 1974 por (Graham, 1974). Posteriormente Zebker e Goldstein, 1986 e Gabriel e Goldstein, 1988, propuseram e demonstraram com sucesso a geração de mapas topográficos a partir de Interferometria SAR.

A **figura 2** ilustra o processo de aquisição das imagens para a interferometria radar, através do uso duas antenas na mesma plataforma, antena A1 e A2, separadas por uma distância denominada de linha-base (B) ou “baseline”, em uma altura H do solo (Mura,1992).

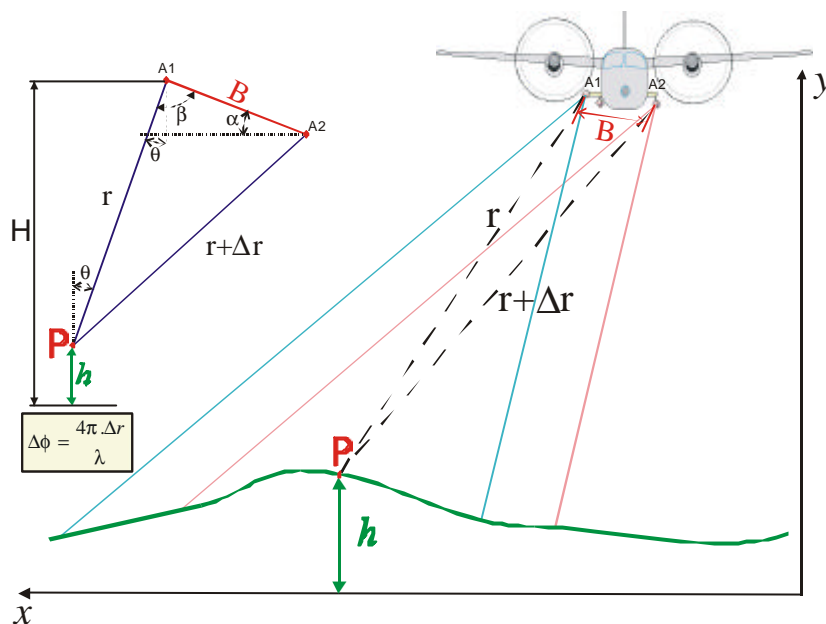


Figura 2 – Conceito de Radar Interferométrico

Dentre as empresas que possuem radares interferométricos, a empresa alemã Aerosensing Radarsysteme foi a escolhida para fornecer o sistema imageador, denominado como AeS-1.

3 Descrição do radar imageador AeS-1

O AeS-1 é um sistema radar imageador de abertura sintética interferométrico, que permite obter mapeamentos com uma resolução de 0,5 x 0,5 m em planimetria e até 5 cm em resolução altimétrica. Este radar opera na frequência de: 9,35 a 9,75 GHz, banda X, com uma largura de faixa de passagem de 400 MHz, frequência de repetição de pulso de 7,6 KHz, largura da faixa de imageamento de 2 km para a escala de 1/5000, e uma velocidade de voo de 50-85 m/s. Para a campanha, o sistema AeS-1 se encontrava instalado em uma aeronave “Turbo Commander 690A” com a seguinte configuração:

- 2 racks com hardware de navegação digital e RF;
- Antena “link” D-GPS;
- Antena GPS;
- Computador de controle: responsável por comandar o transmissor, o receptor, o gerador controlador e as unidades de “disk array. Cada unidade de “disk array” possui uma capacidade de até 144 Gbytes. Possuindo uma contínua taxa de dados de 16 Mbytes/s permitindo obter até 2,5 horas de medição por unidade (~1 Gbyte/Minuto);
- Sistema de navegação CCNS: baseado em um Sistema D-GPS cinemático “on line” acoplado a um “Inertial Navigation System” (INS - sistema de navegação inercial). Os dados GPS da estação em terra são recebidos e processados em tempo real;
- Módulo transmissor/receptor: utiliza um oscilador local de grande estabilidade, um amplificador de saída baseado em TWT (“Travelling Wave Tube”). Circuladores de alta velocidade permitem uma completa operação interferométrica até uma frequência de repetição de impulsos de 16 kHz.;
- 2 antenas tipo “horn”, cada uma pesando 4 kg e possuindo uma “baseline” de 1,6 m;

- Plataforma Inercial –APPLANIX e IGI.

A **figura 3** apresenta os “racks” com os referidos equipamentos:

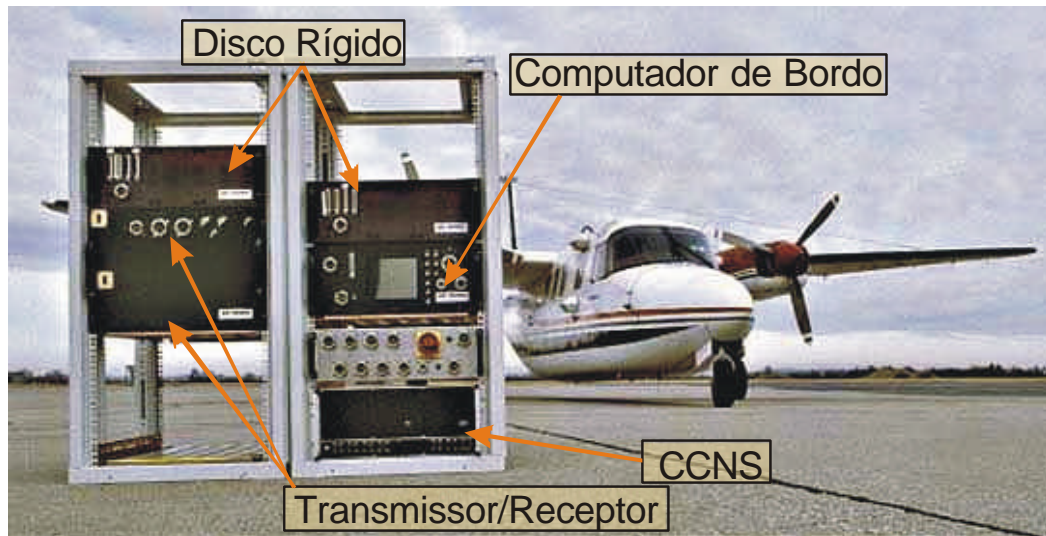


Figura 3 – Racks com hardware de navegação digital, RF e Computador de bordo

Este sistema operou neste projeto com os seguintes especificações de vôo e de radar:

- ângulo de incidência em raio de ação próximo: 29°.
- ângulo de incidência em raio de ação distante: 56°.
- número pixels por linha de imagem: 4096
- altitude de vôo: 4200m

A “base line” utilizada pelo sistema AeS-1 foi de 1,13 m, ortogonal à direção da linha de visada e à direção do vôo, permitindo atingir uma precisão de altura de 0,1 m (1σ), para um ângulo de depressão de 45°. A estabilidade desta “base line” foi garantida por meio de uma estrutura metálica que suportava as antenas nas extremidades.

A conexão das antenas com o sistema de RF foi feito utilizando um conjunto de guias de ondas que estava instalado no interior da barra metálica. O sistema IGI e o APPLANIX foram fixados no meio da barra e as antenas fixadas nas extremidades da barra de metal.

4 -Metodologia

A operação do sistema AeS-1, pode ser descrita por um segmento em solo e um de vôo, conforme o diagrama de blocos mostrado na **figura 4**.

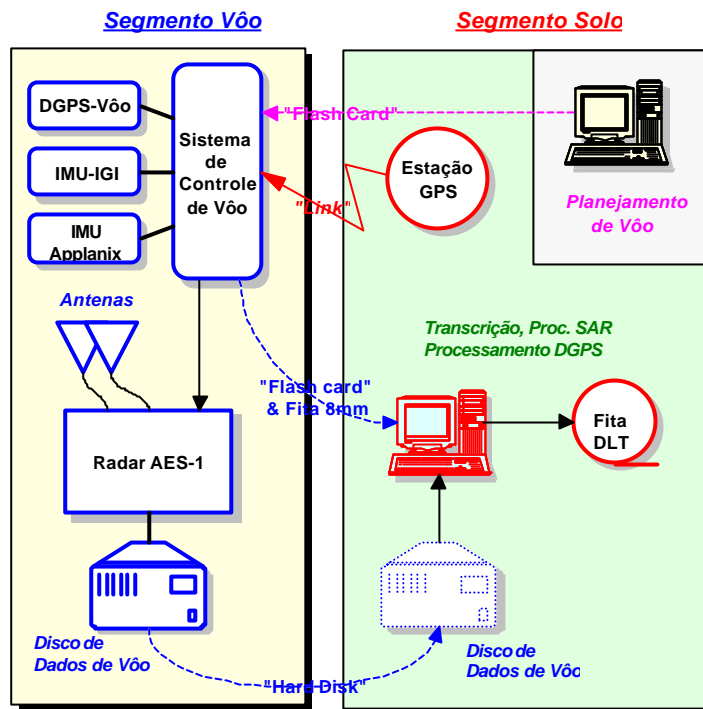


Figura 4 – O sistema AeS-1

O segmento de solo consistiu de três sub-fases. A primeira, se constituiu na definição das faixas de vôo e os locais para colocação dos pontos controle e apoio para as imagens a partir de um pré-reconhecimento de campo.

A segunda sub-fase consistiu na implantação dos pontos de controle pelas equipes de solo que preparavam a região a ser sobrevoada, instalando os pontos de controle que tinham como objetivo identificar as coordenadas e a altitude de determinados pontos na superfície terrestre. Esses pontos serviam como pontos para o georeferenciamento das imagens, permitindo obter o ajustes das mesmas ao terreno. Para que estes pontos de controle pudessem se tornar visíveis ao radar eram instalados sinalizadores metálicos, denominados “corners reflectors” ou simplesmente “corners”.

A terceira fase consistiu da operação de apoio à aeronave para o imageamento, em que eram montados os “corners” nos pontos de controle, previamente implantados na segunda sub-fase do segmento solo, no caso deste projeto foram implantados 228 pontos de controle. Além desta tarefa, foi necessário manter um DGPS em um ponto próximo a área de interesse, transmitindo dados diferenciais para a aeronave durante o imageamento, de forma a permitir que o sistema de navegação pudesse operar com a precisão necessária. Após cada vôo, os dados GPS armazenados em mídia digital, “flash cards”, e os dados das plataformas inerciais em fitas digitais 8mm, eram transferidos e processados na base de apoio, conjuntamente com os dados do GPS de “link” para obter o posicionamento da aeronave a nível centimétrico. A **figura 5** ilustra a operação de campo.

Os dados brutos obtidos pelo sistema radar eram gravados em discos, e após o vôo as mídias eram encaminhadas para a sala de controle, onde os dados de radar eram transcritos em fitas magnéticas DLT e os dados de posicionamento Applanix-GPS eram processados e inseridos nas correspondentes fitas DLT.

Para apoio de comunicação, foram empregados um radiocomunicador tipo HT, para que a equipe de solo se comunicasse com a aeronave, bem como um sistema de telefonia por satélite para comunicação com a base de operações.

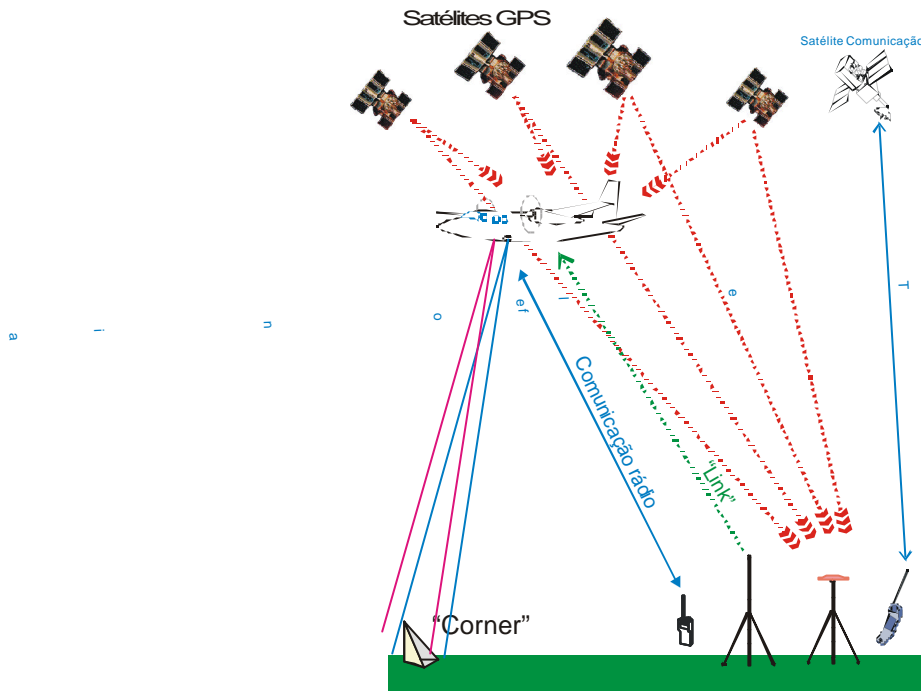


Figura 5 – Diagrama esquemático da operação de campo

O segmento de voo compreendeu a aquisição dos dados radar, operação por sistema de navegação e a aquisição dos dados de atitude, que incluem as informações das plataformas inerciais e GPS. Para a navegação, utilizou-se um sistema denominado CCNS com uma plataforma inercial IGI, associado ao GPS aeronáutico, empregando o “link” com o GPS de solo. Este conjunto de sub-sistemas permite ao piloto utilizar uma tela de navegação em que cada linha de voo era apresentada com um erro de 1m de posicionamento, de maneira que a aeronave percorresse um “corredor” de 10 metros de largura, permitindo assim um controle muito preciso das faixas de imageamento, evitando ocorrência de “buracos” no mapeamento.

Para o georeferenciamento das imagens foi empregada uma segunda plataforma inercial, Applanix, que utiliza três acelerômetros, três giroscópios e um GPS para gerar a informação de posição e atitude da aeronave, denominado de “vetor de atitude”, com precisão de 15 cm nos três eixos. A partir deste vetor de atitude é criado um arquivo de “compensação de movimento”, denominado “Moco”, para cada linha de voo, que por sua vez era inserido na fita DLT após o processamento em solo.

O sistema Applanix possui giroscópios internos que fornecem uma alta acurácia de medidas angulares em períodos pequenos, mas para longos períodos de medição o sensor possui erros angulares acumulativos denominados de “deriva”. O sistema possui também acelerômetros que têm alta precisão de medidas de longo período de “roll” e “pitch”, mas em períodos curtos de medida o sensor apresenta erros. O sistema possui também um GPS, que possui também alta precisão em posição e velocidade, mas baixa taxa de amostragem, e limitações em medidas de atitudes. Com a combinação dos três diferentes sensores se obtém as vantagens dos mesmos sem ter limitações significativas, tendo medidas precisas de atitude em altas taxas de amostragem. A **figura 6** apresenta em diagrama de blocos, a configuração da plataforma inercial Applanix

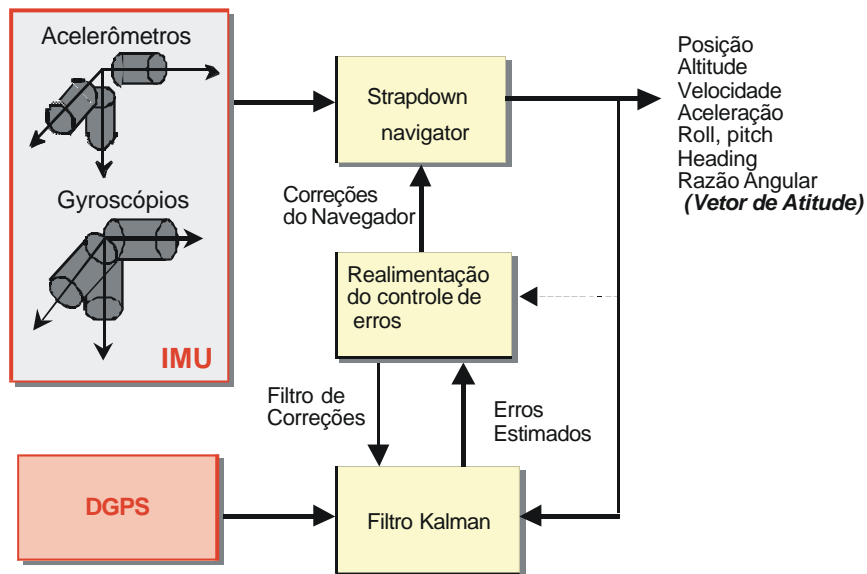


Figura.6 - Sistema de Posicionamento e Orientação APPLANIX

O gráfico da **figura 7** apresenta a resposta dos diferentes sensores isoladamente e o resultado da combinação dos mesmos por meio de um filtro de Kalman, que permite a integração dos dados bem como a filtragem dos erros do sistema.

Esta combinação dos sensores resulta em um sistema de alta acurácia dinâmica com uma grande largura de banda-passante, não apresentando limitações significativas para a aplicação de mapeamento; este tipo de sistema denominado de IMU, “Inertial Motion Unit”. Esta característica do sistema IMU permite obter um bom georeferenciamento, garantindo atingir as precisões de até 10 cm, requeridas para as escalas de trabalho de até 1/2000 para o caso do radar imageador empregado.

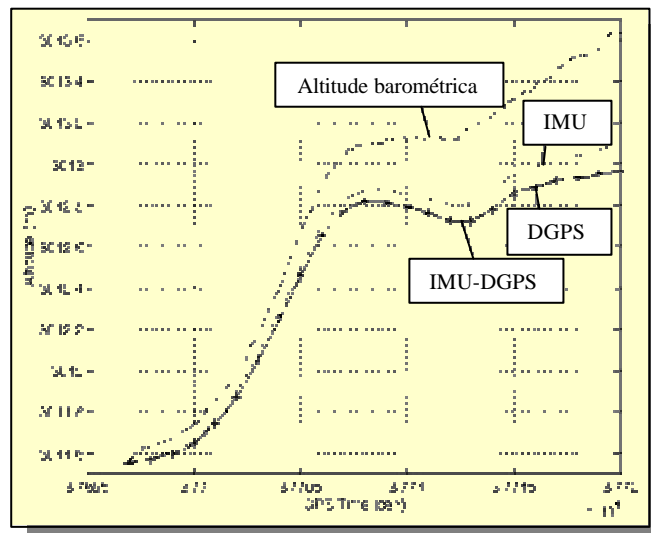


Figura 7 – Comparação entre os sistema de Posicionamento e Orientação

4 – Resultados obtidos

Nesta campanha foram obtidos basicamente dois tipos de produtos: ortoimagem e o modelo digital do terreno, que foi traduzido para curvas de nível para atender as especificações do projeto. As curvas de nível foram geradas pelo fatiamento do modelo em

espaçamento de 2 em 2 metros conforme especificação das cartas na escala de 1/5000, a **figura 8** apresenta um exemplo de ortoimagem gerada.

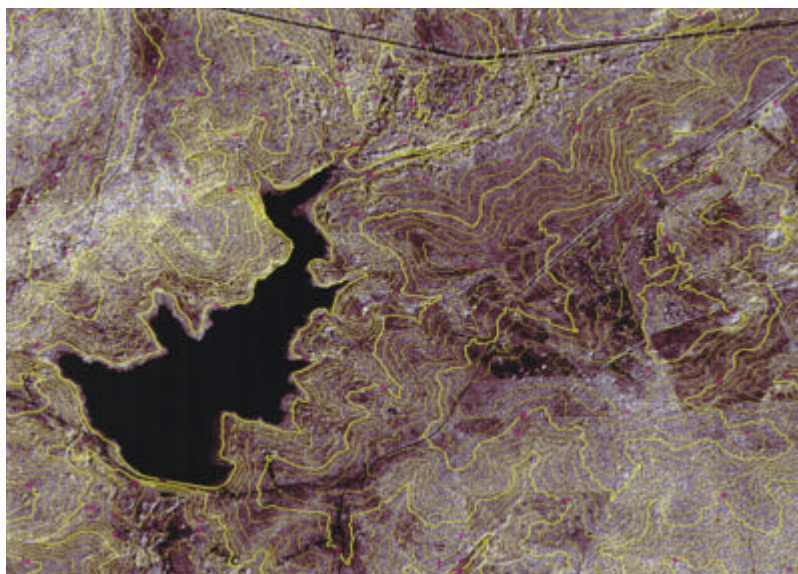


Figura 8 – Ortoimagem SAR com curvas de nível.

Os trabalhos deste projeto demandaram 20 meses, em que 2,5 meses foram dedicados ao planejamento, 5 foram para os trabalhos de campo, 0,5 foi para o vôo e 10 meses foram para o processamento dos dados de vôo e geração das ortoimagens. O trabalho de campo poderia ser reduzido em cerca de 2 meses, se os trechos a serem mapeados não houvessem tido alterações durante o transcurso dos trabalhos. Foram produzidas 373 cartas na escala 1/5000 e 72 cartas na escala 1/25000, totalizando 5558 Km². A **tabela 1.0** apresenta o cronograma geral dos trabalhos.

1998										
Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
Planejamento			Campo					Vôo		
								Mobilização & Treinamento		Calibração
1999										
Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	
Processamento de Dados										
				***						***

*** LEVANTAMENTO DGPS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Tabela 1.0 – Cronograma dos trabalhos

Além dos segmentos descritos, foram realizadas duas visitas ao campo para checagem e avaliação preliminar dos produtos. Foram empregados dois aparelhos GPS geodésicos, que mediram 100 pontos dentro das áreas que foram produzidas as cartas.

O resultado da comparação do modelo digital do terreno com as medidas de campo, nos indicou que nas cartas na escala 1/5000, 9,21% dos pontos medidos apresentaram valores superiores a 1 metro, e somente 4 % dos pontos apresentaram diferenças acima de 2 e menores de 2,5 metros. Para as cartas na escala 1/25000, 5,55 % dos casos, os pontos medidos apresentaram valores superiores a 10 metros e 0,0 % dos pontos apresentaram casos de diferenças acima de 10 e menores que 15 metros.

5- Conclusão e Comentários

O imageador radar demonstrou ter grande eficiência para do uso desta tecnologia para a geração de ortoimagens, devido ao fato do radar imageador operar sem a necessidade de iluminação solar e sobre regiões que possuam cobertura de nuvens, devido a este fato foi possível atender os cronogramas do projeto. Na etapa de processamento dos dados o sistema demonstrou boa performance, permitindo obter cerca de 500Km²/mês, para uma equipe de 12 operadores.

O sistema radar se comparado com a fotogrametria convencional, necessita de uma etapa de trabalho de campo adicional, que é a colocação dos “corners” nos pontos de controle. Esta tarefa necessita ser sincronizada com os vôos, demandando assim uma boa programação no número de refletores e na colocação do mesmos. Como estes refletores são articulados, a operação de montagem, posicionamento e recuperação é muito rápida não sendo um fator limitante aos trabalhos. As equipes de trabalho não eram numerosas para o desenvolvimento dos trabalhos, totalizaram 14 pessoas no segmento de solo e 8 pessoas no segmento de vôo, sendo que parte da equipe de processamento realizou os trabalhos de avaliação.

Fazendo-se uma análise geral dos resultados das ortoimagens obtidas, verificou-se que as diferenças altimétricas permaneceram dentro dos limites estabelecidos de ½ eqüidistância na escala correspondente em 90% dos pontos. Os poucos pontos onde as diferenças foram maiores que ½ eqüidistância ocorreram provavelmente devido ao “efeito da cobertura vegetal” e/ou à insuficiência de pontos de controle em determinadas áreas.

A avaliação dos resultados foi realizada utilizando-se as coordenadas obtidas nos levantamentos DGPS. Não se utilizou nessas avaliações, dados obtidos nos levantamentos realizados anteriormente, por não se conhecer a exatidão desses documentos.

Referências

- Applanix Corporation. **Position and Orientation Solutions for Direct Georeferencing of Aerial Photography**. <http://www.applanix.com/html/prod_airborn_dg_over.html> nov. 2000.
- Mura, J.C. **Mapeamento topográfico por interferometria utilizando. Imagens SAR do ERS-1.** Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e processamento de Imagens , 6., (SIBGRAPI 93), Recife, 1993. **Anais.** Recife:SBC/UFPe 1993. P.61-64, Comunicações.
- Graham, L. C., **Synthetic interferometer radar for topographic mapping**, Proceeding of the IEEE, Vol. 62, No. 6, pg. 763-768, june 1974.
- Zebker, H. A. e Goldstein, R. M., **Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations**, **Journal of Geophysical Research**, Vol. 91, No. B5, pg. 4993-4999, abril de 1986.