

## **A Geração de Modelos Digitais de Elevação pela Estereoscopia de Radar: Conhecimento Atual e Resultados com Imagens RADARSAT-1 na Amazônia**

WALDIR RENATO PARADELLA<sup>1</sup>  
IZABEL CRISTINA FRANCHITTO CECARELLI<sup>2</sup>  
CLEBER GONZALES DE OLIVEIRA<sup>2</sup>  
SILVIA LUIZ<sup>2</sup>  
MARIA CAROLINA DE MORAIS<sup>1</sup>  
CARLA PEREIRA COTTINI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758 - CEP 1227-010- São José dos Campos - SP, Brasil  
{waldir, morais@ltid.inpe.br}

<sup>2</sup>Geoambiente Sensoriamento Remoto S/C Ltda  
Av. Anchieta, 117-CEP 12242-280- São José dos Campos -SP, Brasil  
{izabel, silvia, cleber, carla@geoambiente.com.br}

**Abstract** This paper presents an update of the state-of-the-art of DEM extraction based on RADARSAT-1 data and addresses the DEM generation with Standard and Fine images over the Carajás Province (Amazon Region) based on the OESE (PCI) software. The achieved results demonstrate the potential to generate DEMs for the moist tropics using the information provided by RADARSAT-1. Further efforts have to be made to improve the elevation accuracy through the use of differential GPS in the field.

**Keywords:** DEM generation, RADARSAT-1 stereo data, Brazilian Amazon Region

### **1.Introdução**

Muito países na América Latina, Ásia e África Equatorial apresentam como características a cobertura de nuvens quase perene e baixa taxa de informação sobre recursos naturais. O uso de sensores remotos é uma opção na obtenção de informações destes ambientes, porém com limitações no espectro óptico, devido às condições atmosféricas desfavoráveis, que impedem imageamentos sistemáticos e influenciam na radiometria das imagens. Na Amazônia, a presença de fumaça contribui para restringir ainda mais a disponibilidade de dados ópticos.

Modernamente, o planejamento, a exploração e o monitoramento dos recursos naturais de um território, tem como base informações geográficas. O substrato para a integração de informações geográficas é a carta topográfica. Na Amazônia, a disponibilidade de cartas em escalas de detalhe, é baixa, e as existentes, carecem de atualização. Por outro lado, o advento do RADARSAT-1 possibilitou a estereoscopia em condições atmosféricas adversas, e permite a extração de modelos digitais de elevação (DEMs), um componente fundamental na cartografia. Neste contexto, este trabalho apresenta uma revisão do conhecimento sobre a geração de DEMs pela estereoscopia de radar e resultados com imagens Standard e Fine na Serra dos Carajás. A investigação é parte de um projeto de capacitação da Geoambiente SR no uso da tecnologia Radar em aplicações geoambientais, através de cooperação com INPE e fundos do Programa de Inovação Tecnológica em Pequena Empresa (PIPE) da FAPESP (Projeto PIPE # 1999/06271-7).

## 2. Fundamentação

Um radar de abertura sintética ou SAR (Synthetic Aperture Radar) é um dispositivo imageador em rádio-frequência, que fornece uma imagem bidimensional (range, azimuth) da realidade tridimensional pela detecção da radiação retroespalhada quando o sensor ilumina a superfície, sob um campo bem definido de microondas ativas. Um SAR mede propriedades elétrico-geométricas do terreno, opera independentemente do Sol, tem geometria de iluminação controlada, penetra nuvens, brumas, fumaças e até chuvas (dependendo da frequência usada), e produz imagens com resolução espacial comparável à alta resolução dos sensores ópticos.

Um DEM é uma representação digital de uma seção da superfície, através de uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (x,y) e valor de intensidade do pixel correspondendo à elevação. DEMs são uma das mais importantes fontes de dados em análises geo-espaciais e geração de orto-imagens. Quatro métodos, que apresentam vantagens e desvantagens, são usados na geração de DEMs com radares: clinometria, estereoscopia, interferometria e polarimetria (Toutin & Gray 2000). Imagens interferométricas orbitais foram adquiridas do planeta em fevereiro de 2000 pela missão SRTM da NASA, mas apenas DEMs regionais com 90 metros de resolução espacial ("level-1 data sets") compatíveis com a escala de 1: 250.000 estarão disponíveis para a comunidade internacional. Desta forma, pela versatilidade do RADARSAT-1, com imageamentos sob grande variação de incidência e elevada resolução espacial, a estereoscopia orbital surge como uma opção de enorme potencial comercial para mapeamentos cartográficos de detalhe em áreas remotas como a Amazônia.

Um DEM é gerado de pares estéreos do RADARSAT-1 através da radargrametria ou estereoscopia de radar (Leberl 1998). Este processo é similar ao da fotogrametria convencional, no sentido de que imagens SAR são usadas como imagens ópticas ou fotos aéreas. Com a radargrametria, duas imagens da mesma área são adquiridas sob diferentes incidências permitindo a estereoscopia. Pontos de mesma posição no terreno são modelados e usados para derivar a elevação do DEM. Importante salientar que no trópico úmido, elevações obtidas via banda C-HH representam uma aproximação da elevação real do terreno, função da interação da energia das microondas com o dossel da floresta tropical, e não a medida altimétrica efetiva.

Pesquisas sobre o uso da radargrametria na extração de elevação têm apresentado resultados controversos e uma dicotomia entre a teoria de propagação de erros e os resultados práticos, particularmente em áreas de topografia elevada (Toutin 1999a). A experiência da fotogrametria indica que uma boa geometria em estéreo é obtida quando o ângulo de interseção (diferença entre as incidências) das imagens no par estereoscópico é o maior possível. Nesta situação ocorre a maximização da paralaxe, a qual é usada para determinar a elevação do terreno. Por outro lado, uma ótima configuração em radargrametria requer que as duas cenas sejam as mais similares possíveis radiometricamente. Isto implica em pequenos ângulos de interseção para que os retroespalhamento nas imagens sejam os mais próximos possíveis. A abordagem com dados ópticos modela erros na extração do DEM através de parâmetros geométricos, e negligencia o aspecto radiométrico das cenas, que é a base para o processo de correlação automática na derivação da elevação na radargrametria. Isto explica porque grandes ângulos de interseção e elevada resolução espacial de imagens SAR, nem sempre fornecem DEMs com elevada acurácia. Em vários experimentos, a acurácia em elevação tende inclusive a comportar-se de modo oposto, especialmente para terrenos montanhosos. Somente em casos de relevos planos é que a acurácia obtida aproxima-se da expectativa teórica ( Leberl et al. 1988, Toutin 1996, Raggam & Almer 1996). Em síntese, para qualquer tipo de relevo é necessário um compromisso entre aspectos de disparidades geométricas e radiométricas na escolha de melhor conjunto de estéreo-pares na

geração de um DEM. Neste sentido, um conhecimento mais sólido dos fundamentos em SAR é pré-requisito para o processo de geração do DEM pela radargrametria.

Outro aspecto importante refere-se ao tipo de terreno. Imagens de radar são sensíveis às variações da macro e da microtopografia (mergulho da superfície e rugosidade superficial em relação ao comprimento de onda do SAR, respectivamente). Consequentemente, é esperado que DEMs radargramétricos sejam anisotrópicos e mais dependentes de descritores do relevo (declividade, aspecto), que DEMs gerados pela fotogrametria. Toutin (1999b) avaliou o impacto destes descritores na acurácia de DEMs do RADARSAT-1 e constatou que a acurácia tem grande correlação com a declividade, mas não tanto com o aspecto. Além disso, esta correlação depende da geometria em estéreo utilizada. De modo geral, constata-se uma menor acurácia para DEMs de topografias moderadas quando comparados com DEMs de terrenos planos. Em adição, a degradação da acurácia é maior para grandes intervalos de incidência (S1/S7, F1/F5), e consequentemente, maior homogeneidade é obtida com geometria mais fraca (S4/S7, F2/F4).

Cabe por último uma discussão sobre valores de acurácia em elevação obtidos de DEMs do RADARSAT-1. Os resultados dos vários trabalhos publicados no Simpósio final de avaliação do RADARSAT-1 (ADRO) de Montreal, em outubro de 1998, dificultam comparações e generalizações, pelas diferentes formas de expressão de acurácia apresentadas (desvio-padrão, erro médio quadrático, erro linear com porcentagem de confiança, etc.), pelos diferentes métodos de análise, de fisiografias e terrenos, e distintas configurações de pares estéreos (Paquerault & Maitre 1998, Sylvander et al. 1998, Dowman & Chen 1998, Raggam & Gutjahr 1998, Toutin 1998d). Os trabalhos posteriores são mais abrangentes (Toutin 1999d, 2000), e indicam acurácias de 27 a 46 metros de elevação, expressas em erros lineares com 90% de confiança (LE90), para terrenos moderadamente acidentados (tabela 1), e em torno de 45 metros para relevos montanhosos (tabela 2), sob geometrias de estéreo-pares próximas às usadas em Carajás.

**Tabela 1. Acurácias de DEMs do RADARSAT-1 de relevos planos e moderados**

Estéreo-par	Acurácia (relevo plano)	Acurácia (relevo suave)	Acurácia (DEM inteiro)
F2-F4 (Desc/mesmo lado)	24 metros	27 metros	33 metros
F5-F1 (Asc/mesmo lado)	12 metros	36 metros	25 metros
S4-S7 (Desc/mesmo lado)	24 metros	46 metros	45 metros

**Tabela 2. Acurácias de DEMs do RADARSAT-1 de relevos montanhosos**

Estéreo-par	Acurácia (LE90)
F2-F4 (Asc/mesmo lado)	45 metros
F1-F5 (Desc/mesmo lado)	45 metros

### 3. Características Gerais da Área Teste

A pesquisa conduzida na Serra de Carajás correspondeu à área coberta pela carta topográfica SB-22-Z-A-II (Folha Serra dos Carajás) produzida pelo IBGE (1:100.000). A região é caracterizada por relevo de serras e platôs alinhados, com altitudes máximas de 850 metros, constituído por

sedimentos e rochas vulcano-sedimentares arqueanas do Grupo Grão Pará (Formações Águas Claras, Carajás e Parauapebas). Na parte central da área, com altitudes de 450 a 500 metros e relevo colinoso, ocorre um batólito granítico proterozóico. No entorno da Serra, em planícies de altitudes de 200 a 300 metros, afloram rochas gnaissicas arqueanas (Complexo Xingu). A região é parte da Floresta Nacional de Carajás, com cobertura de Floresta Equatorial Ombrófila.

#### 4. Materiais e Metodologia

Dois estéreo-pares com imagens Standard descendentes (S5-S7) e Fine ascendentes (F1-F4) foram utilizadas (tabela 3). As imagens S5, S7 e F4 foram adquiridas em 1996 durante o Programa ADRO. A imagem F1 foi adquirida com fundos do PIPE. O software usado foi o OrthoEngine Satellite Edition-OESE versão 6.3 (PCI 1999) e as seguintes etapas foram seguidas na geração dos DEMs: (a) criação do projeto, (b) aquisição de pontos de controle do terreno ou "ground control points" (GCPs), (c) aquisição de pontos de amarração ou tie-points (TPs), (d) criação de imagens epipolares, (e) extração automática do DEM, (f) edição e geocodificação do DEM. A correlação de imagens é o processo central do mapeamento automático na radargrametria. A correlação de imagens substitui a capacidade humana de identificar pontos homólogos no par. No OESE o algoritmo é baseado na correlação de área normalizada, num cálculo que maximiza o coeficiente de correlação (Toutin 2000).

**Tabela 3: Características das imagens RADARSAT-1 usadas na pesquisa.**

Imagem	Standard 5	Standard 7	Fine 1	Fine 4
Órbita-data	Desc-31/05/96	Desc-11/09/96	Asc-12/04/2000	Asc.-20/05/96
Incidência	36-42 <sup>0</sup>	45-49 <sup>0</sup>	37-40 <sup>0</sup>	43-46 <sup>0</sup>
Resolução	24,2 x 27 m	22,09 x 27 m	9,1 x 8,4 m	8,1 x 8,4 m
Área imageada	100 x 100 Km	100 x 100 Km	43 x 43 Km	43 x 43 Km
Pixel	12,5 x 12,5 m	12,5 x 12,5 m	6,25 x 6,25 m	3,125 x 3,225 m

#### 5. Resultados

##### 5.1 DEM S5-S7 com GCPs da Carta Topográfica

Inicialmente foram coletados GCPs usando-se a imagem S5 e a carta topográfica. Os GCPs foram transferidos para pontos homólogos na imagem S7, coletados os TPs nas duas imagens e geradas imagens epipolares (imagens reamostradas para minimizar erros em range). No processo de extração do DEM foram testadas opções de suavização e preenchimento de vazios. Como o cálculo da correlação automática na extração do DEM é afetado pelo ruído speckle (Sylvander et al. 1998), foram também gerados DEMs a partir das duas imagens originais filtradas (Enhanced Frost) e o melhor resultado indicou uma acurácia de elevação em rms de 60 metros. A impossibilidade de se dispor bons GCPs da carta topográfica, i. é., dispostos homoganeamente na área e englobando extremos mínimos e máximos de elevação, contribuiu para os resultados pobres de acurácia, quando comparados com a literatura.

## **5.2. DEM S5-S7 com GCPs da Carta Topográfica e de Imagens TM-Landsat**

Como a carta topográfica foi produzida através de recobrimentos da USAF de 1967 e restituição do IBGE de 1981, a rede de estradas mais recentes ligada aos projetos de mineração de CVRD não estava representada. Esta malha viária todavia, era evidente nas imagens TM-Landsat e RADARSAT. Na busca de melhoria da acurácia de elevação foi investigado o uso de GCPs extraídos de duas fontes: carta topográfica e composição colorida TM-Landsat (4R5G3B) ortorretificada com DEM da carta. Um total de 37 pontos foram inicialmente coletados sendo 20 pontos da carta topográfica e 17 pontos da composição TM-Landsat. De modo geral, os GCPs do TM foram adquiridos ao longo das estradas Aeroporto de Carajás-Mina de Ferro N4E, Mina do Manganês Azul- Mina de Ouro do Bahia e pontos nas margens dos Rios Itacaúnas e Parauapebas. A partir deste novo conjunto de GCPs foi calculado o ajuste do modelo ("bundle adjustment"). Como seis GCPs apresentavam resíduos muito elevados, tais pontos foram descartados e um total de 31 GCPs e 23 TPs foi usado na extração final do DEM. A melhoria da acurácia em elevação foi obtida com um rms final de 42,2 metros.

Uma comparação qualitativa entre o DEM da carta topográfica e o DEM S5-S7 foi feita através da análise de perfis topográficos, dispostos segundo mesmas direções (NE-SW e NW-SE) e da distribuição de curvas de contorno. De modo geral, os perfis da radargrametria modularam melhor o relevo da área, sem a presença de cumes truncados e vales de fundos chatos, presentes nos perfis da carta topográfica. Já em relação à distribuição de curvas de contorno, observou-se que o DEM S5-S7 não foi capaz de representar todos os extremos de elevação da carta topográfica, devido provavelmente, aos resíduos elevados presentes.

## **5.3. Estéreo-par F1-F4 com GCPs da Carta Topográfica e de Imagens TM-Landsat**

Um total de 20 GCPs foram coletados das duas fontes de dados, sendo 10 pontos provenientes da carta topográfica e 10 pontos extraídos da composição colorida TM. O DEM F1-F4 (imagens originais com filtragens EFrost) forneceu uma acurácia em elevação em rms de 62 metros. Embora este valor tenha sido maior que o obtido com o DEM S5-S7, a análise visual detalhada de outros atributos do DEM F1-F4 (contraste de tonalidade, densidade e distribuição das linhas de contorno) indicou um produto superior, com linhas de contorno de elevação em número, densidade e distribuição espacial muito similares às presentes na carta topográfica. Além disso, a detecção de feições planimétricas é muito superior nas imagens Fine que nas Standard, pela melhor resolução espacial. De modo a ilustrar este melhor desempenho, nas figuras 1 e 2 são mostrados os três DEMs e a distribuição de curvas de nível, para uma mesma área, extraídas dos dois produtos radargramétricos e da carta topográfica do IBGE.

## **6. Conclusões**

As principais conclusões da pesquisa foram: (1) os dois melhores DEMs obtidos (S5-S7, F1-F4) apresentaram acurácias de elevação (rms) piores que as publicados em literatura, para configurações próxima e outros tipos de ambiente. Todavia, a natureza dos GCPs utilizados na pesquisa (com baixa acurácia, distribuição não homogênea e não abrangendo locais com cotas mínimas e máximas) contribuiu fundamentalmente para estes resultados; (2) embora o valor em acurácia de elevação do DEM F1/F4 tenha sido maior que o do DEM S5/S7, a análise visual comparativa de outros atributos dos DEMs (contraste e detalhes das imagens, densidade e distribuição das linhas de contorno, perfis topográficos) indicou que o DEM F1-F4 foi superior ao S5-S7. Em adição, as imagens Fine permitiram melhor detecção de feições planimétricas

(drenagens, estradas, uso da terra, etc.), importante aspecto na confecção de carta topográfica. Os resultados da investigação, embora preliminares, foram muito animadores e indicam o grande potencial da tecnologia em atender especificações técnicas de mapeamento cartográfico da Amazônia, em escalas de semi-detulhe ou maiores, com os dados atuais do RADARSAT-1 e com o advento de dados polarimétricos do RADARSAT-2 e PALSAR-1 (2002/2003). A continuidade da pesquisa enfocará a melhoria da acurácia de elevação através do uso de novos GCPs obtidos com GPS de precisão no terreno. Esta fase prevista para 2001-2002 terá o apoio da DSG (Diretoria de Serviço Geográfico), órgão do Ministério da Defesa (Exército Brasileiro).

## Referências

Dowman, I. J., Chen, P. 1998. "A rigorous stereo method for DEM generation from RADARSAT data", In: *Proceedings*, Final ADRO Symposium, Montreal, Canada, CD-ROM.

Leberl, F. W. 1998. "Radargrammetry", in *"Principles & Applications of Imaging Radar"*, Manual of Remote Sensing, 3<sup>rd</sup>. Edition, Editors F. Henderson, & A. Lewis, Cap. 4., Amer. Soc. Phot. and R.S., John Wiley & Sons Inc. N. Y., pp: 184-269.

Leberl, F. W., Mayr, W., Domik, G., Kobrick, M. 1988. "SIR-B stereo-radargrammetry of Australia". *International Journal of Remote Sensing*, 9 (5): 997-1011.

OESE 1999. "OrthoEngine Satellite Edition", Version 6.3 The User's Manual. PCI Geomatics, Richmond Hill, Canadá.

Paquerault, S., Maitre, H. 1998. "Elevation Model Generation by Using RADARSAT Images". In: *Proceedings*, Final ADRO Symposium, Montreal, Canadá, CD-ROM.

Raggam, H., Almer, A. 1996. "Assessment of the Potential of JERS-1 for relief mapping using optical and SAR data". In: *Proceedings*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part. B4, Commission IV, pp; 671-676.

Raggam, H., Gutjahr, K. 1998. "DEM Generation Using RADARSAT Stereo Data" In: *Proceedings*, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, CD-ROM.

Sylvander, S., Petitcolas, B., Cousson. D., Souyris, J. 1998. "Evaluation of the potential of RADARSAT images for the production of Digital Terrain Model by radargrammetry. In: *Proceedings*, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, CD-ROM.

Toutin, T. 1996. "Opposite-side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (2): 543-549.

Toutin, T. 1998. "Stereo RADARSAT for mapping applications". In: *Proceedings*, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, CD-ROM.

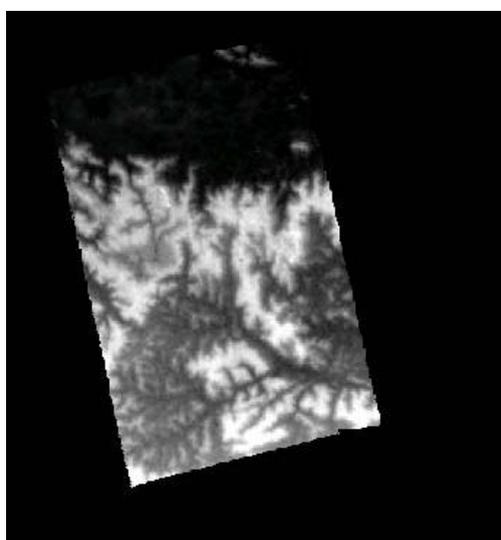
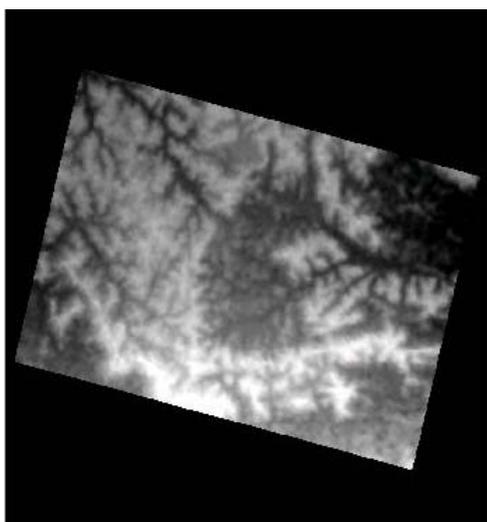
Toutin, T. 1999a. "RADARSAT for stereoscopy: the quest for radar stereo pairs for DEM generation". *Geomatics Info Magazine International*, 13 (1): 6-9.

Toutin, T. 1999b. " Slope and aspect dependence of radargrammetric DEM", In: *Proceedings*, 4<sup>th</sup>. International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 21<sup>st</sup>. Canadian Symposium on Remote Sensing , Ottawa, Canadá, CD-ROM.

Toutin, T. 1999c. "Error tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (5): 2227-2238.

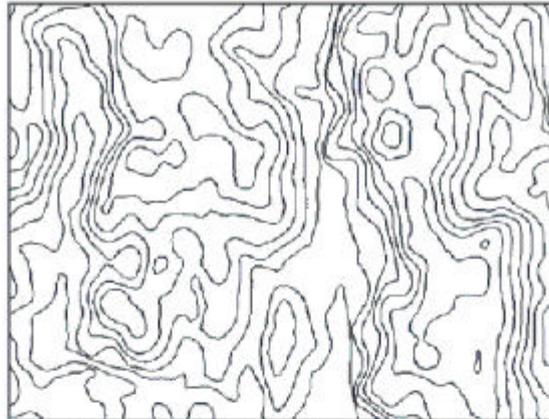
Toutin, T. 2000. "Evaluation of radargrammetric DEM from RADARSAT Images in high relief areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (2): 782-789.

Toutin, T., Gray, L. 2000. "State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data" *ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55: 13-33.

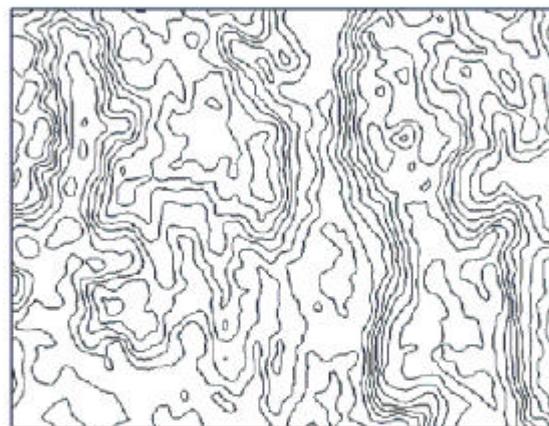


  
**GEOAMBIENTE**  
Info@geoambiente.com.br  
Tel./Fax.: (0xx12) 341-1251

Figura 1. DEMs S5-S7 (superior), F1-F4 (centro) e Carta Topográfica (inferior)



Curvas de nível extraídas do DEM radargramétrico gerado das imagens Standard 5 e 7



Curvas de nível extraídas do DEM radargramétrico gerado das imagens Fine 1 e 4



Curvas de nível vetorizadas da carta topográfica

Figura 2. Curvas de nível de DEMs S5-S7, F1-F4 e Carta Topográfica.