

## **Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações**

Waldir Renato Paradella  
José Claudio Mura  
Fabio Furlan Gama  
Athos Ribeiro dos Santos  
Guilherme Gregório da Silva

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{waldir,athos,gsilva}@dsr.inpe.br,{mura,fabio}@dpi.inpe.br

**Abstract.** This paper is a short review of SAR concepts and addresses the recent trend of orbital SAR systems, the current and planned availability of data, and the main related application techniques. Emphasis is put on the extraction of information using satellite SAR based on amplitude, and also on amplitude plus phase and polarization through Radargrammetry, Interferometry and Polarimetry. Finally, perspectives on the use of these technologies in Brazil are emphasized and references are provided covering the topics highlighted in the paper.

**Palavras-chave:** Radar de Abertura Sintética (SAR), Radargrammetria, SAR Interferométrico (InSAR), Interferometria de Deformação SAR (DInSAR), SAR Polarimétrico (PolSAR).

**Key-words:** Synthetic Aperture Radar (SAR), Radargrammetry, Interferometric SAR (InSAR), Differential Interferometric SAR (DInSAR), Polarimetric SAR (PolSAR)

### **1. Introdução**

Como é conhecido, um número elevado de sistemas orbitais com radar imageador de abertura sintética ou SAR (Synthetic Aperture Radar) tem sido lançado nas duas últimas décadas ou está em desenvolvimento. Da mesma forma, está disponível cada vez mais um acervo fantástico de dados de recobrimentos do planeta desde o advento do primeiro satélite com SAR em 1978. A transformação destes dados em informação e o seu uso em aplicações implicam em esforços de pesquisa e capacitação na compreensão dos vários aspectos desta tecnologia espacial. De modo geral, é sempre válida a premissa que a qualidade do uso de imagens SAR depende do entendimento mínimo pelo usuário da fundamentação do sensor, da área de investigação e da aplicação/disciplina envolvida. A partir de um início de aplicações centradas na extração de informação de imagens de amplitude (interpretadas como imagens ópticas), a evolução da tecnologia tem consolidado três campos de aplicações bem específicos: a radargrammetria, a interferometria e a polarimetria. Os dois primeiros já atingiram um estágio de maturidade, com aplicações operacionais. A polarimetria ainda carece de maior validação em seu uso. Da mesma forma, os SARs orbitais tem migrado de grandes plataformas para sistemas cada vez mais leves, compactos, e que operam em constelações. O texto enfoca uma análise resumida de tendências em termos de sistemas e aplicações.

### **2. Fundamentação**

Um SAR opera na região das micro-ondas de radio, no intervalo entre 1 mm a 1m em comprimento de onda ( $\lambda$ ). Vários são os atributos do imageamento SAR como (1) sua independência de fonte solar (sensor ativo) com versatilidade de imageamentos diurno/noturno, (2) pouco afetado pela atmosfera (micro-ondas penetram nuvens, e em certa extensão, até chuvas), (3) é o único sensor remoto que permite penetrabilidade nos alvos, (4) a natureza das propriedades medidas é única (propriedades elétricas e geométricas do alvo) e (5) possui enorme capacidade em prover medidas quantitativas de propriedades dos alvos.

A geometria de um SAR é de visada lateral, com o feixe de iluminação sendo irradiado em ângulo ortogonal à direção de trajetória do satélite. Uma imagem bidimensional (alcance x azimuth) do terreno imageado é obtida com a detecção do sinal retroespalhado, através da combinação da movimentação do sensor e da transmissão periódica de pulsos ortogonalmente à direção de trajetória do satélite (Figura 1a). É importante realçar que um SAR detecta energia retroespalhada de uma célula de resolução tridimensional no espaço iluminado, descrita pelas dimensões em resoluções espaciais em alcance e azimuth e pela altura através do padrão de iluminação vertical da antena (Figura 1b). Quando o campo elétrico da iluminação interage com o alvo, são induzidas cargas na superfície e correntes elétricas no seu interior. As características desta interação são controladas pela polarização da onda emitida, pela permissividade elétrica complexa do material, pela forma/geometria e orientação do alvo.

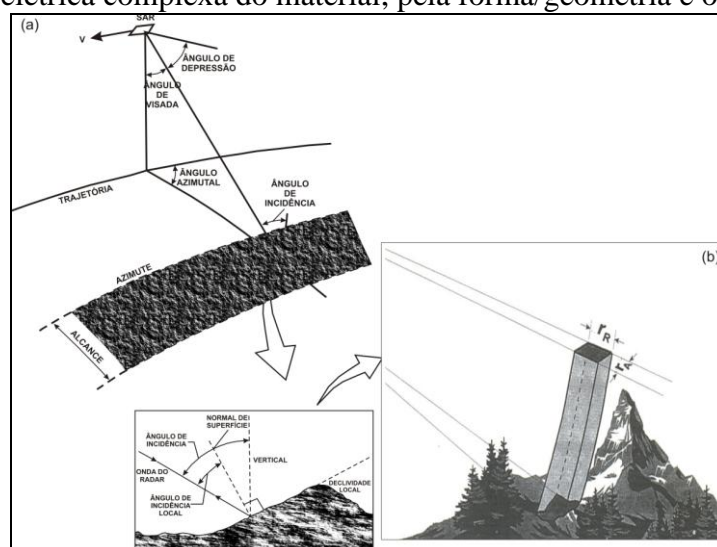


Figura 1. a) Geometria de imageamento de um SAR e grandezas angulares, b) Célula de resolução que é tridimensional no espaço iluminado e que é transformada nas dimensões de alcance e azimuth (Raney 1998).

Através de técnicas de processamento, a intensidade e a fase do sinal retroespalhado de cada célula de resolução são extraídas e representadas numericamente na forma de um número complexo. A informação de amplitude indica quanto o alvo reflete da iluminação, e da fase, quão distante o alvo se encontra da antena.

### 3. Sistemas orbitais e tendências

O conceito SAR foi proposto por Carl Wiley em 1951 e está relacionado à síntese de uma antena longa para melhorar a resolução espacial em azimuth quando comparado com um radar convencional (abertura real). Satélites com SARs seguem órbitas síncronas e os sistemas mais comuns utilizam comprimento de onda ( $\lambda$ ) nas bandas X (3 cm), C (5 cm) ou L (23 cm). O primeiro SAR orbital foi o SEASAT em 1978 (vida útil de 106 dias) sendo seguido pelo lançamento do ERS-1 em 1991. Várias missões ocorreram posteriormente, com sistemas operando sob diferentes configurações (Tabela 1). No início deste desenvolvimento, satélites de grandes dimensões foram lançados com plataformas adequadas para prover massa, volume, potência suficiente e requisitos da taxa de dados elevada na operação de um SAR. Sistemas orbitais de dimensões e pesos consideráveis implicavam em lançadores muito potentes. Como consequência, estas combinações de satélites e lançadores levaram a custos elevados, e poucos sistemas foram lançados e/ou tornaram-se operacionais. A tecnologia ficava restrita a poucos países ou agências. Como exemplo, excluindo-se as missões com os ônibus espaciais da NASA, que são consideradas sub-orbitais, as duas plataformas mais pesadas com SAR foram o ENVISAT (ASAR) e o ALOS (PALSAR-1) com 8,2 e 3,85 toneladas.

Tabela 1. Principais sistemas orbitais com SAR. Melhor resolução em metros (range; azimute). Do SEASAT ao PALSAR-1 as missões foram completadas (fonte: atualização de Ouchi 2013).

satélite	agência/país	ano	banda	resolução	polarização	peso kg
SEASAT	NASA/EUA	1978	L	6; 25	HH	2.290
SIR-A	NASA/EUA	1981	L	7; 25	HH	idem
SIR-B	NASA/EUA	1984	L	6; 13	HH	idem
ERS-1	ESA	1991	C	5; 25	VV	2.400
ERS-2	ESA	1995		5; 25	VV	2.400
ALMAZ	URSS	1991	S	8; 15	HH	3.420
JERS-1	NASDA/Japão	1992	L	6; 18	HH	1.400
SIR-C/ X-SAR	NASA/EUA, DLR/Alemanha ASI/Itália	1994	L, C X	7, 5; 13 6; 10	Quad VV	11.000
RADARSAT-1	CSA/Canadá	1995	C	8; 8	HH	3.000
SRTM	NASA/EUA DLR/Alemanha	2000	C X	15; 8 8; 19	Dual VV	13.600
ASAR	ESA	2002	C	10; 30	Dual	8.211
PALSAR-1	JAXA/Japão	2006	L	5; 10	Quad	3.850
SAR LUPE	Alemanha	2006/08	X	0,5; 0,5	Quad	770
RADARSAT-2	CSA/Canadá	2007	C	3; 3	Quad	2.200
Cosmo-Skymed	ASI/Itália	2007-10	X	1; 1	Quad	1.700
TerraSAR-X	DLR/Alemanha	2007	X	1; 1	Quad	1.230
TanDEM-X	DLR/Alemanha	2009	X	1; 1	Quad	1.230
RISAT-1	ISRO/INDIA	2012	C	3; 3	Quad	1.858
KOMPSAT-5	KARI/Coreia Sul	2013	X	1; 1	Quad	1.400
SENTINEL-1	ESA	2014	C	5; 5	Dual	2.300
PALSAR-2	JAXA	2014	L	3, 1	Quad	2.000

Os desenvolvimentos posteriores resultaram em grande redução em (1) tamanho e volume de unidades de potência e de componentes eletrônicos e (2) em tamanho e peso das antenas. Como consequência, houve uma mudança de paradigma, com o advento de satélites menores, mais leves e uso de lançadores menos potentes e mais baratos. Esta tendência também resultou no ímpeto para operação por constelação, priorizando a redução de tempo de revisita. Um destes exemplos é o SAR Lupe, com cinco satélites de aplicação militar da Alemanha, que operam com antena parabólica de 3m de diâmetro e plataforma leve (770 kg). Na Figura 2 são mostrados os sistemas SARs em operação em novembro 2014. Esta tendência de sistemas leves (light-SAR) continuará em 2018 com o lançamento do RCM (RADARSAT Constellation Mission), com três satélites de 1.300 kg cada, resolução espacial métrica, revisita diária e inovação da polarização compacta (transmissão de uma polarização circular e recepção de polarizações duplas H e V). A Argentina desenvolve sua constelação SAOCOM em colaboração com a Itália (ASI), com dois satélites SAR (1A, 1B) em banda L quad-pol, 1600 kg cada, revisita de 16 dias (um satélite) e 8 dias (constelação) e lançamento do 1A previsto para 2015/2016.

Na Figura 3 são mostradas imagens geradas pelos quatro sistemas mais recentes (o europeu Sentinel-1, o indiano RISAT-1, o japonês ALOS-2/PALSAR-2 e o coreano KOMPSAT-5). Estes sistemas juntamente com o italiano Cosmo-Skymed (quatro satélites), o alemão TerraSAR-X/TanDEM-X (dois satélites) e o canadense RADARSAT-2 fornecem grandes opções de recobrimento do planeta para várias aplicações. Cabem ainda duas observações: (1) a China lançou em 18/nov/2012 o HJ-1C (Huanjing-1C), o primeiro dos

quatro satélites com SAR da constelação civil Huanjing para aplicações ambientais e monitoramento de desastres. Trata-se de um SAR leve (890 kg), operando em altitude de 500 km, com antena parabólica (6 x 2,8 m) e vida útil prevista para três anos. Provavelmente pela herança de cooperação com a Rússia (Almaz) utiliza a banda incomum S-VV, com melhor resolução espacial de 5 metros. Não foram obtidas informações sobre a qualidade real das imagens geradas e nem se o SAR continua ativo (NASA 2012); (2) a NEC (Japão) está desenvolvendo um SAR leve (< 500 kg), altitude de 504 km, banda X-HH, resolução espacial (< 1m) e antena refletora parabólica de 3 m diâmetro (Tsunesaku et al. 2011).

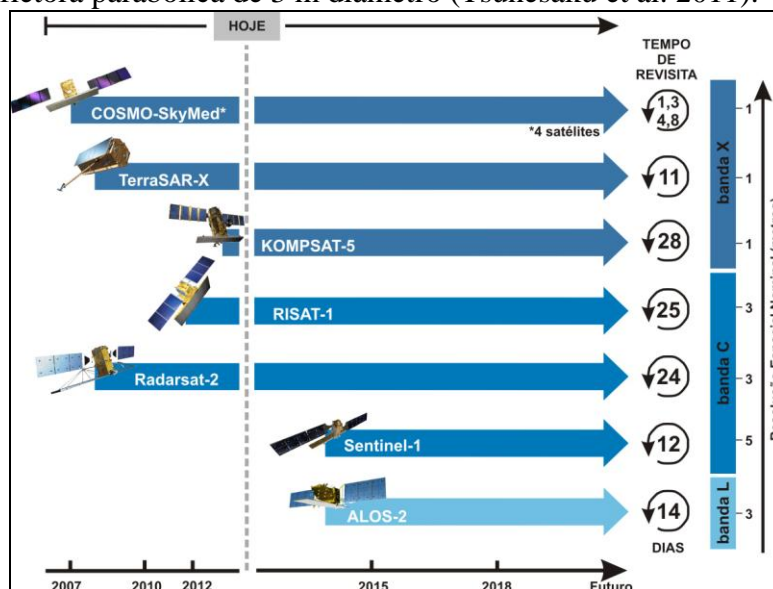


Figura 2. Sistemas orbitais com SAR operando atualmente, com informações de banda, tempo de revisita e aumento na resolução espacial (adaptado de TRE 2014).

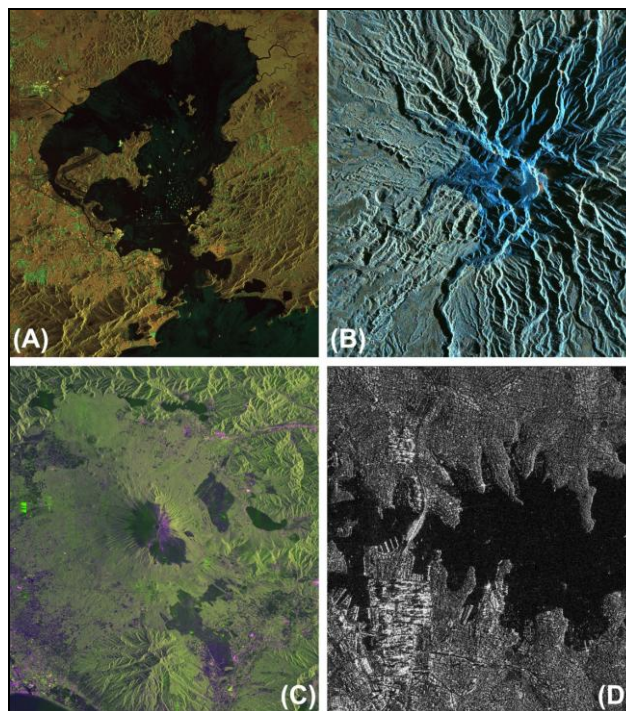


Figura 3. Imagem gerada pelo (A) Sentinel-1 (Rio de Janeiro, 11/jul/2014), (B) RISAT-1 (Monte Kelud, Indonésia, 09/mar/2014), (C) PALSAR-2 (Monte Fuji, 20/jun/2014) e (D) KOMPSAT-5 (Sydney, Austrália, 01/dez/2013). Fontes: Agencias ESA, ISRO, JAXA e KARI.

#### **4. Aplicações e tendências**

As aplicações com os primeiros sistemas enfocaram o uso da amplitude em aplicações diversificadas, como na detecção de óleo em oceanos e radargrametria. Mais recentemente, dois novos campos de aplicação têm sido enfatizados, explorando os atributos da fase e da polarização do sinal retroespalhado: a interferometria e a polarimetria. Estes assuntos são enfocados a seguir.

##### **4.1. Radargrametria**

A forma mais intuitiva para extrair a informação de profundidade das imagens de sensoriamento remoto é a estereogrametria, na qual a posição no espaço 3D é obtida por meio de imagens estereoscópicas de radar, com a detecção de mudanças da localização de pixels homólogos relacionadas com a elevação (paralaxe). Imagens com diferenças em incidência e/ou azimute de visadas são utilizadas no estéreo-par. Um grande esforço de pesquisa foi despendido nas últimas duas décadas pelo grupo de radar em Geociências do INPE na avaliação da qualidade de imagens de vários sensores (RADARSAT-1, PALSAR-1, RADARSAT-2, TerraSAR-X) para mapeamento planialtimétrico de ambientes diversificados no país (Paradella et al. 2005; Oliveira et al. 2011, entre outros). A síntese conclusiva destes trabalhos indica que o incremento em resolução espacial e qualidade dos dados observados da evolução dos primeiros sistemas (RADARSAT-1, PALSAR-1) para o mais recentes (RADARSAT-2, TerraSAR-X) respondem pela melhoria em acurácia de mapeamento planialtimétrico (Classe A do PEC nacional) da escala 1:100.000 para 1:50.000.

##### **4.2. Interferometria (InSAR e DInSAR)**

O grande potencial de informação contido na fase do sinal retroespalhado levou ao desenvolvimento da tecnologia da Interferometria SAR (InSAR), e posteriormente, da Interferometria de Deformação (DInSAR). Detalhes sobre este assunto em Paradella et al. (2012). InSAR é hoje uma tecnologia operacional na geração de Modelos Digitais de Superfície para a produção de cartas topográficas. No presente, um modelo digital de elevação do planeta no padrão HRTI-3 (acurácia em Z melhor que 2 m) está sendo gerado com a missão TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement). Todavia, a grande evolução tem sido relacionada com a tecnologia A-DInSAR (Advanced-DInSAR), particularmente com a PSI (Persistent Scatterer Interferometry), cada vez mais utilizada como tecnologia operacional para monitoramento de deformações na superfície em vários campos de aplicação (obras de engenharia, óleo e gás, mineração, desastres naturais, transporte, desenvolvimento urbano, etc.). A PSI foi desenvolvida pelo POLIMI (Politecnico di Milano) em 2000 (Ferretti et al. 2001), patenteada pela empresa TRE, e visa detectar e monitorar medidas de diferenças em fase de alvos especiais de radar (espalhadores persistentes), caracterizados por respostas de amplitude e fase estáveis durante longo período. Tipicamente alvos que se comportam como PS são refletores de radar estáveis, estruturas construídas pelo homem (postes das ruas, torres de transmissão, edifícios, pontes, dutos expostos, estruturas de telhado, objetos que estão associados ao diedro, respostas triedro) e alvos naturais (afloramentos de rochas, superfícies dos solos não vegetadas, rochedos etc.). Em geral, um conjunto mínimo de 15 imagens (stack) é utilizado e a acurácia de deformação detectada nesta série temporal é da ordem de poucos milímetros por ano ao longo da linha de visada do SAR. Esta técnica também foi desenvolvida pela empresa Gamma Remote Sensing (Suíça) através do software comercial IPTA-Interferometric Point Target Analysis. Ferretti et al. (2011) desenvolveram um novo algoritmo conhecido como SqueeSAR, que trata os espalhadores persistentes (PS), juntamente com espalhadores distribuídos (DS), com o objetivo de superar os limites da técnica PSInSAR em quantidade de pontos amostrais no terreno. Deve ser salientado que a combinação de imageamento interferométricos em tomadas opostas (órbitas

ascendentes e descendentes) permite adicionalmente, extrair os componentes de deformação vertical e horizontal no terreno. Resultados das tecnologias DInSAR e PSI (modelagens SqueeSAR e IPTA) têm sido publicados no monitoramento de estabilidade de taludes de cavas e pilhas de estéril nas minas de ferro e manganês da Mineradora Vale S.A. em Carajás (Hartwig et al. 2013, Pinto et al. 2014, Mura et al. 2014). A Figura 4 mostra resultado da SqueeSAR com dados TerraSAR-X na detecção de deformações para as minas de ferro do Carajás. Finalmente, outro parâmetro importante extraído da interferometria é a coerência, que tem sido usada em aplicações florestais devido à correlação com biomassa vegetal.

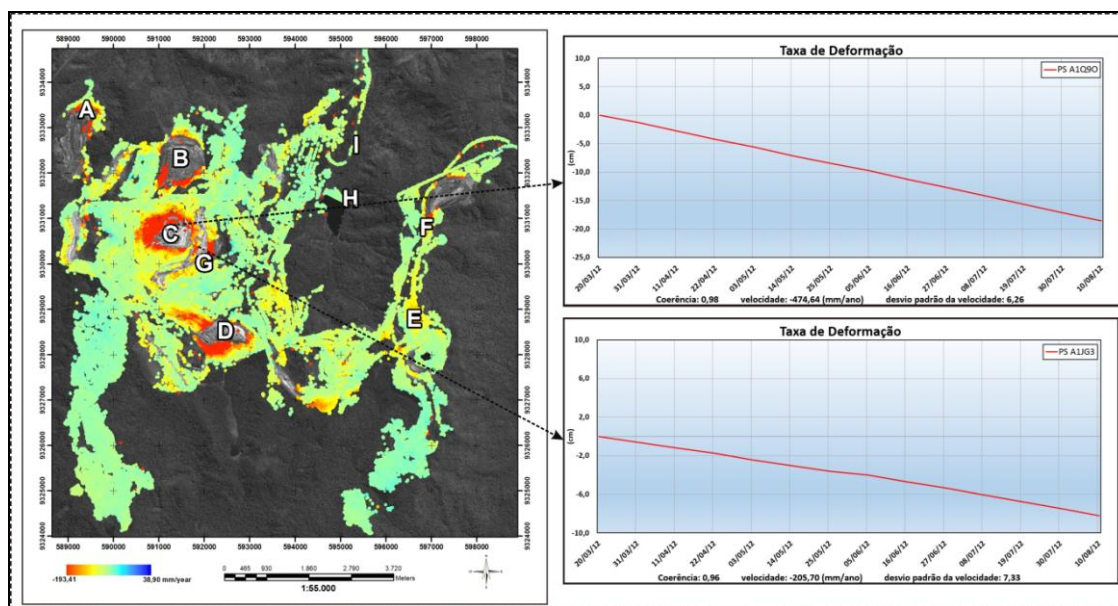


Figura 4. Distribuição espacial de PS obtidos pela abordagem SqueeSAR para as minas de ferro de Carajás, usando-se 14 imagens TerraSAR-X (23/03-10/08/2012) visualizada pela taxa de velocidade de deformação (mm/ano). Cores na barra de deformação são indicativas de sentido de movimentação: vermelho = provavelmente subsidência, azul= provavelmente alçamento. A maior parte do complexo mineral esteve estável durante o período monitorado (regiões verdes- azuladas). Taxas de deformação elevadas (regiões amarelo-avermelhadas) foram detectadas para pilhas de estéril (A, B, C, D e F) e taludes de corte (G). Exemplos de perfis de deformação/tempo para recalque em pilha (superior) e talude de corte (inferior). Fonte: Proc. FAPESP no. 2010/51267-9.

#### 4.3. Polarimetria SAR (PolSAR)

Teoricamente, dados polarimétricos permitem extrair o máximo de informação da resposta em retroespalhamento do alvo iluminado, quando comparado com aquisições em polarização simples, dual ou mesmo multipolarizada. A PolSAR registra as mudanças de estado de polarização do sinal retroespalhado pelas características elétricas e geométricas do alvo, de tal forma, que estas propriedades podem ser derivadas através da informação de amplitude de cada polarização (componentes HH, VV, HV, HV) e da fase entre os componentes. A natureza física e a magnitude dos mecanismos de espalhamento estão contidas na matriz de espalhamento [S] do sinal, definida para cada célula de resolução, e que podem ser decompostas em parâmetros para aplicação em processos de classificação digital de imagem. As matrizes de covariância [C] ou coerência [T], derivadas da matriz de espalhamento [S], são a base dos principais métodos empregados para classificação de imagens polarimétricas.

A expectativa de que a polarimetria possa ampliar o uso de imagens SAR tem levado ao lançamento de sistemas orbitais recentes com atributos polarimétricas. Todavia, embora o potencial seja grande, o uso da polarimetria SAR em aplicações tem mostrado ainda

limitações (necessidade de uma compreensão interação radar-alvo, disponibilidade de dados bem calibrados, algoritmos mais robustos, etc.), que dificultam uma utilização prática quando comparado com abordagens convencionais (amplitude), ou com a radargrametria e a interferometria. Exemplos de PolSAR com dados orbitais podem ser vistos em estudos florestais (Santos et al. 2009), pesquisa mineral (Silva et al. 2013) e detecção de derramamento de óleo (Zhang et al. 2011). Cabe ser destacado todavia, um campo ativo de pesquisa em aplicações florestais, o Pol-InSAR, integrando informações de polarimetria (classificação de alvos por mecanismos de espalhamento) e interferometria (altura dos espalhadores). Neste sentido, a DLR desenvolve com a NASA o ambicioso programa Tandem-L com imageamentos através dois SARs em banda L em aquisição simultânea de dados polarimétricos e interferométricos (single-pass). Os satélites usarão antenas parabólicas refletoras (15 m de diâmetro), revisita de 8 dias e lançamentos previstos para 2020.

## 5. Conclusões

A concepção atual de satélites com SAR prioriza sistemas leves, uso em constelação, resolução espacial elevada, atributos interferométricos e polarimétricos. Das aplicações, a interferometria, particularmente a DInSAR, é a mais madura, de grande aplicabilidade comercial. Isto requer sistemas com ciclo curto de revisita reduzindo a decorrelação temporal e a perda de coerência interferométrica. A proposta de construção de um SAR em banda L, que consta no PNAE - Programa Nacional de Atividades Espaciais (INPE 2013) estabelece um sistema de grande massa (2-3 toneladas), antena planar, ciclo de revisita elevado (25 dias) e resolução espacial de 5-30 m. A concepção data de 2009 inspirada em prover um sistema auxiliar SAR ao monitoramento de desflorestamento na Amazônia conduzido com sensores ópticos. A proposta foi submetida pelo INPE à China (CBERS-SAR), e posteriormente ao BNDES (Fundo Amazônia), não sendo viabilizada. Assumindo-se que dois grandes vetores de investimentos publico/privado são prioritários na agenda atual do país, representados por implantação de obras de infraestrutura urbanas (metrovíários, estradas, ferrovias, etc.) e exploração petrolífera (pré-sal), uma proposta atual para um SAR deve levar em conta estas realidades. A opção pela banda L dos usuários decidida na iniciativa MAPSAR (Schroder et al. 2005) atende aplicações gerais, incluindo a detecção de desflorestamentos na Amazônia e detecção de óleo em oceanos (Migliaccio et al. 2009). Além disso, resultados de DInSAR em monitoramento de deslizamentos de terra abre perspectivas de seu uso no monitoramento de riscos urbanos. Uma proposta de uma constelação de sistemas light-SARs, em banda L, com elevada resolução espacial e atributos polarimétricos e principalmente interferométricos, é mais atrativa e compatível com o estado atual de inovação e de aplicação da tecnologia. Finalmente é muito importante uma parceria internacional com agência de tradição e competência comprovadas neste campo de conhecimento.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto FAPESP-Vale-INPE (Processo FAPESP 2010/51267-9). Os autores também agradecem ao CNPq por subsídios fornecidos ao primeiro e último autores (Bolsas PQ/CNPq e PCI/CNPq).

## Referências

Chinese Long March 2C lofts Huanjing-1C into orbit (NASA 2012). Disponível em: <<http://www.nasaspaceflight.com/2012/11/chinese-long-march-2c-huanjing-1c-into-orbit/>>. Acesso em: 05.nov.2014.

Ferretti, A.; Fumagalli, A.; Novali, F.; Prati, C.; Rocca, F.; Rucci, A. A New Algorithm for Processing Interferometric Data- Stacks: SqueeSAR™. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49 n. 9, p. 3460-3470, 2011.

Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 1, p. 8-20, 2001.

Hartwig, M. E.; Paradella, W. R.; Mura, J. C. Detection and monitoring of surface motions in active mine in the Amazon region, using persistent scatterer interferometry with TerraSAR-X satellite Data. **Remote Sensing**, v.5, p. 4719-4734, 2013.

INPE. Prestação de Contas Ordinária Anual-Relatório de Gestão do Exercício de 2012, data: 03/2013, Disponível<<https://contas.tcu.gov.br/econtrole/ObterDocumentoSisdoc?codArqCatalogado=5903651&seAbrirDocNoBrowser=1>> Acesso em 06.nov.2014.

Migliaccio, M.; Gambardella, A.; Nunziata, F.; Shimada, M.; Isoguchi, O. The PALSAR polarimetric mode for sea oil slick observation. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens**, v. 47, p. 4032–4041. 2009

Mura, J.C.; Paradella, W.R.; Gama, F.F., Santos, A.R., Galo, M., Camargo, P.O., Silva, G.G.; Silva, A. Q. Monitoring of Surface Deformation in Open Pit Mine Using DInSAR Time-Series: A Case Study in the N5W Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. **Proceedings SPIE**, v. 9243, 13 ps., 2014.

Oliveira, C.G.; Paradella, W.R., Silva, A.Q. Assessment of radargrammetric DSMs from TerraSAR-X Stripmap images in a mountainous relief area of the Amazon region. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, V. 66, p. 67-72, 2011.

Ouchi, K. Recent trend and advance of Synthetic Aperture Radar with selected topics. **Remote Sensing**, V.5, p. 716-807, 2013.

Paradella, W.R.; Mura, J.C; Gama, F.F.; Santos, A.R. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 46, n.6, p.797-811, 2012.

Paradella, W.R.; Oliveira, C.G.; Luiz, S.; Cecarelli, I.C.F.; Cottini, C.P.; Okida, R. Operational use of RADARSAT-1 fine stereoscopy integrated with TM-landsat 5 data for cartographic application in the Brazilian Amazon. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 31, n.2, p. 139–148, 2005.

Pinto, C. A.; Paradella, W.R.; Mura, J.C.; Gama, F.F.; Santos, A.R.; Silva, G.G. Results of the application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in the Azul open pit manganese mine (Carajás Province, Amazon region) using TerraSAR-X data. **Proceedings SPIE**, v. 9245, 13 ps., 2014.

Raney, K. Radar Fundamentals: Technical Perspective, In: **Manual of Remote Sensing**, 3rd Ed., v. 2., capítulo 2, Am. Soc. for Photog. and R.S., p. 9-130.

Santos, J. R.; Narvaes, I.S.; Graça, P. M. L. A.; Gonçalves, F.G. Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon.. In: Gary Jedlovec (NASA/MSFC-USA) Org. **Advances on Geoscience and Remote Sensing**, 1a.ed.Vukovar, Croatia: IN-TECH, v. 8, p. 183-206, 2009.

SAR satellites and orbital paths (TRE). Disponível em: <http://treuropa.com/technique/sar-imagery/>. Acesso em: 04.nov.2014.

Schröder,R.; Puls, J.; Hajnsek, I.; Jochim, F.; Neff, T.; Kono, J.; Paradella, W.R.; Silva, M.M.; Valeriano, D.M.; Costa, M.P.F. MAPSAR: a small L-band SAR mission for land observation. **Acta Astronautica**, v.56, p.35-43, 2005.

Silva, A.Q.; Paradella, W.R., Freitas, C.C.; Oliveira, C.G. Evaluation of Digital Classification of Polarimetric SAR Data for Iron-Mineralized Laterites Mapping in the Amazon Region. **Remote Sensing**, v.5, p. 3101-3122, 2013.

Tsunekazu, T.; Takashi, F.; Kiyonobu, O. 2011. Small SAR satellite technology promotes dissemination of a comprehensive space utilization system. **NEC Technical Journal**, v. 6, n. 1, p. 71-75., 2011.

Zhang, B.; Perrie, W.; Li, X.; Pichel, W.G. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image. **Geophysical Research Letters**, V. 38, L10602, p.1-5, 2011.