# Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais

Fábio Furlan Gama
Waldir Renato Paradella
José Claudio Mura
Athos Ribeiro dos Santos

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

**Abstract.** In the last two decades, the advent of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) technique has opened new perspectives in the use of orbital imaging radar for quantitative surface deformation measurements. In the last few years this trend was considerably expanded through the use of large stacks of SAR images collected over the same area, instead of the classical two interferometric acquisitions used in the standard configurations. Advanced DInSAR techniques are nowadays more quantitative geodetic tools rather than simple qualitative tools available for land deformation detection. The paper reviews the main INSAR concepts, the current availability of orbital SAR data, and addresses PSinSAR (Persistent Scatterer InSAR) and SBAS (Small Baseline Subset), two innovative advanced forms of DInSAR for the detection of millimetric ground displacements in various application fields.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, processamento de imagens, deformação de superfície, DInSAR, PSInSAR, SqueeSAR, SBAS.

## 1. Introdução

Um avanço notável na área de detecção e monitoramento dos deslocamentos de superfície tem ocorrido com o advento da aquisição sistemática de dados orbitais de radares de abertura sintética (SAR). Com a geração de imagens de alta resolução espacial do terreno e a possibilidade de medir a distância do sensor ao alvo, através do registro do tempo entre a emissão das ondas electromagnéticas de antena do sensor e a recepção do sinal de retroespalhamento a partir do solo. As variações na distância medida em momentos diferentes permitem a detecção de deslocamentos de terra, sendo o princípio da técnica interferométrica SAR (InSAR).

A primeira geração de tecnologia InSAR Diferencial, referida como DInSAR, foi proposta em meados da década de 90. O potencial da técnica é, principalmente, devido a: (1) as vantagens operacionais pela ampla cobertura de área a baixo custo, (2) as capacidades elevadas de medição de deformação, as quais são comparáveis com alguns métodos clássicos geodésicos, (3) a aquisição regular de dados ao longo do tempo, e (4) a disponibilidade de arquivos históricos de dados SAR. Atualmente vários SARs orbitais estão em uso ao redor do mundo, fornecendo dados para este tipo de aplicações de sensoriamento remoto.

Este artigo aborda os fundamentos das duas técnicas de abordagens que trabalham com múltiplas interferogramas de um conjunto de imagens SAR: método espalhador persistente (PSInSAR) e subconjunto de pequena linha base (SBAS). Estas técnicas permitem a detecção de deslocamentos de superfície com taxas entre alguns centímetros até milímetros por ano.

## 2. Fundamentos de Interferometria SAR (InSAR)

Um sistema SAR é composto por um sistema de aquisição, um processador (Doppler), que converte o sinal de retroespalhamento em imagem. O princípio SAR envolve a transmissão de uma frequência modulada linearmente (FM) por um pulso *chirp*, permitindo a utilização de impulsos mais longos para aumentar a energia de pulso. Utilizando técnicas de

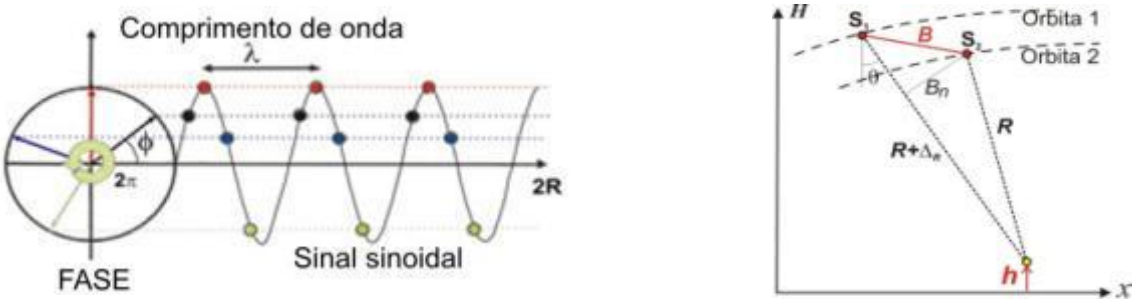
processamento, a intensidade e a fase do sinal de retroespalhamento de cada célula de resolução do solo podem ser calculadas na forma de uma imagem de valor complexo, definido por valores de amplitude e fase.

A fase de uma célula de resolução é representada pelo argumento de um número complexo resultante e a fase de contribuição de mecanismos diversos espalhador dentro da célula de resolução. Esta fase pode sofrer rotação devido à reflexão, as propriedades dielétricas dos dispersores, ou mesmo ser atrasado dependendo da posição relativa dos dispersores dentro da célula de resolução.

A fase do sinal recebido é distribuída uniformemente entre 0 e 360 graus ou 0 e 2π radianos (Figura 2a). A sensibilidade de fase para uma variação da distância é alto: um desvio de fase de 2π corresponde a λ/2 (λ é o comprimento de onda do sensor). A distância entre o sensor para o alvo do solo é medida ao longo da linha de visada (*LOS*) ou dimensão *slant range* (*R*), a fase introduzida por esta distância é dada por:

$$\Phi = (2\pi / \lambda)\ 2R \qquad (1)$$

Uma vez que não é possível separar as diferentes contribuições de fase, o valor de fase de uma única imagem SAR não tem uso prático. Uma abordagem mais adequada é a análise da diferença de fase entre duas ou mais imagens SAR, obtendo uma imagem interferométrica ou InSAR. Isto é possível com a combinação de sinais de radar a partir de duas antenas separadas espacialmente ou temporalmente após o registro de imagem apropriada numa base de pixel-a-pixel. A Figura 2b ilustra esta geometria de aquisição, onde *B* é a linha de base (distância entre as aquisições de S1 e S2), e *ΔR* é a diferença dos alcances e *h* é a altura do terreno. Duas situações são possíveis: a plataforma emprega duas antenas para a aquisição de duas cenas simultâneas ou uma antena realiza as aquisições em geometria quase idêntica em dois momentos distintos (passagens repetidas).




a) b)

Figura 2 – a) Fase interferométrica com a distância em *slant range*; b) Geometria InSAR.

A diferença de fase interferométrica para a geometria InSAR mostrado na Figura 2b pode expressa por:

$$\Delta\Phi = (4\pi / \lambda).\ \Delta R \qquad (2)$$

A partir da figura 2b e da equação (2) observa-se que a variação em altura h provoca uma variação na ΔR e, consequentemente, uma variação em ΔΦ, que é o conceito básico da medição da altura por interferometria SAR.

A fase interferométrica pode ser medida a partir do elemento de resolução complexa de valores apenas no módulo 2π. A diferença total de intervalo entre os dois pontos de observação, que representa a fase (figura 2b), em geral, podem ser muitos múltiplos do comprimento de onda do radar ou, expresso em termos de fase, múltiplos de 2π. A determinação da fase única, é realizada pelo processo "desenrolamento de fase", determina a

fase relativa entre os pixels que é diretamente proporcional à diferença de escala. Por sua vez, a fase interferométrica medida ($\Delta\Phi$) sofre influência de uma série de fatores, tais como: (a) topografia, (b) incerteza na determinação orbital, (c) atrasos atmosféricos, (d) ruído do sistema e (e) método de processamento (Massonnet e Feigl, 1998).

A descorrelação temporal causa medições interferométricas pouco confiáveis devido a alterações nas posições relativas do espalhador dentro da célula de resolução (Zebker e Villaseñor, 1992). A técnica InSAR orbital apresenta um grande potencial para duas aplicações específicas: (1) a produção de DEMs de alta resolução com pares adquiridos simultâneos em geometria ligeiramente diferentes, e (2) a detecção da deformação da superfície (DInSAR) de pares que se estendem num intervalo conveniente de tempo. No entanto, InSAR orbital ainda não é uma ferramenta totalmente operacional, com grandes limitações causadas por descorrelação temporal e geométrica e pelos efeitos atmosféricos.

## 2.1 Interferometria diferencial (DInSAR)

A interferometria diferencial (DInSAR) baseia-se no cálculo, numa base pixel-a-pixel da diferença de fase entre duas imagens complexas adquiridos em tempos distintos. A primeira demonstração da DInSAR de passagens repetidas para detecção de deformação superficial do solo foi apresentada por Gabriel et al. (1989). Por sua vez, o valor de fase de uma imagem SAR pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\Phi = \Psi + (\lambda / 4\pi)\, r + \alpha + n \qquad (3)$$

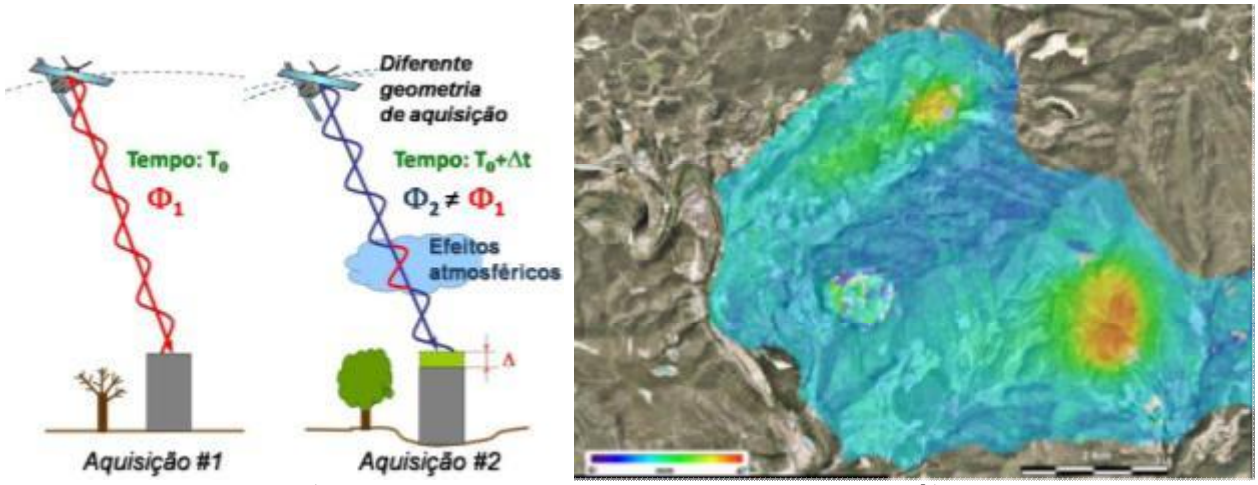
Onde: $\Psi$ representa a fase, $r$ é a distância do sensor ao alvo (alcance inclinado), $\alpha$ é a contribuição da atmosfera, e $n$ é o ruído do sensor. Assumindo que os termos reflectividade alvo e a contribuição da atmosfera são constantes sob duas aquisições, e que o ruído do sistema é desprezível, os valores de fase de um interferograma serão proporcionais ao deslocamento do alvo entre as duas aquisições.

A aquisição repetida de imagens de uma determinada área é geralmente realizada utilizando o mesmo sensor, ou com as características do sistema de sensores idênticos, como no caso dos satélites ERS-1 e ERS-2, e atualmente com a constelação COSMO-Skymed. Vários estudos de aplicação foram realizados empregando dados do ERS-1, incluindo estudos em deslocamento da superfície devido a dinâmica dos glaciares (Goldstein et al, 1993.), deformação vulcânica (Massonnet et al, 1995) e terremotos (Massonnet e Feigl, 1998). Deste modo, qualquer deslocamento do alvo ao longo da linha de visada (LOS) do satélite cria uma mudança de fase no sinal que pode ser detectada por meio da comparação dos valores de fase adquiridos em tempos diferentes (Figura 3a).

Vários fatores poldem reduzir a qualidade dos resultados DInSAR. Dentre eles, o mais importante é a descorrelação temporal dos fenômenos causados pela variação das propriedades electromagnéticas dos alvos de radar. Assim, o interferograma pode não detetar os valores de deslocamento, uma vez que o primeiro termo na equação (Eq. 3) não pode ser considerado idêntico nas duas imagens SAR. Evidentemente, diferentes alvos são caracterizados por diferentes decorrelações: áreas cobertas por vegetação muda a refletividade muito mais rapidamente do que as áreas rochosas ou urbanas.

O impacto dos fenômenos descorrelação temporais aumenta à medida que a linha de base temporal do interferograma aumenta (intervalo de tempo entre as duas aquisições SAR). Além da descorrelação de fase, os efeitos de propagação na troposfera e ionosfera podem variar significativamente durante a primeira e a segunda aquisição, criando assim as perturbações de fase que dificultam a geração do interferograma. A Figura 3b apresenta um resultado DInSAR, empregando dados ENVISAT-ASAR, com intervalo de 35 dias de aquisição.

Considerando que em muitos casos a coerência espacial é baixa devido à descorrelação temporal, causada por alterações nas respostas de alvo, a técnica DInSAR apresenta limitações quando utilizado em áreas com vegetação.




a) b)

Figura 3 – a) Variação de superfície e a medida de fase (Fonte: Dehls, 2006); b) Mapa de deformação da mina de Solsona, Espanha (Fonte: Instituto de Geomatica, Espanha).

## 2.2 Espalhadores persistentes (PSInSAR)

O termo PSInSAR está relacionado a técnicas InSAR que analisam a evolução temporal da fase de espalhadores pontuais coerentes (PS). Esta técnica foi proposta por Ferretti et al. (1999) e trata alvos de radar de fase coerente dentro de uma célula de resolução, cujas as amplitudes e fases sejam estáveis presente ao longo de um conjunto as imagens, organizadas como uma pilha de dados.

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 rochosos, superfícies dos solos não vegetadas, rochedos etc.).

A técnica PSInSAR utiliza grandes pilhas (*stacks*) de imagens para gerar interferogramas diferenciais em relação a uma imagem referência comum a todas, normalmente seleccionados no centro da série de tempo para melhorar a coerência ao conjunto de interferograma diferencial. Todas as combinações de linhas de base são utilizadas, mesmo aqueles que ultrapassem a linha de base crítica. A Figura 6a mostra um exemplo de configuração de três linhas de base normais (*Bn*) em relação à faixa principal (*SM*).

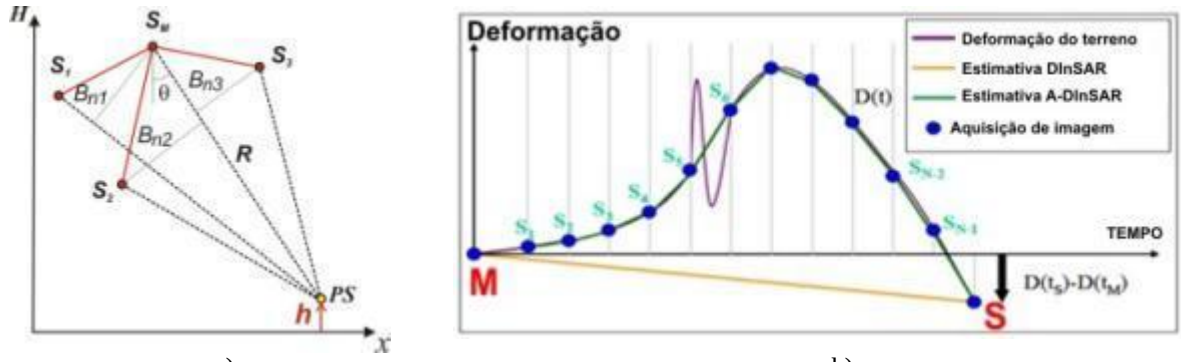
A técnica PSInSAR é limitada pelo número de imagens SAR disponíveis distribuídos temporalmente (amostragem temporal), que permite detectar a deformação no tempo. A Figura 6b mostra um exemplo de deformação superficial e as medidas utilizando um conjunto de aquisições utilizando dados SAR. Nota-se que com apenas duas aquisições, *M* e *S*, a técnica DInSAR permite a apenas a medição da deformação D(ts)-D(tm). Usando *N* aquisições, a técnica PSInSAR pode ser aplicada permitindo uma melhor medida da deformação, exceto no intervalo de $S_5$ e $S_6$, devido a amostragem temporal não ser suficiente para o fenômeno ser detectado; desta forma, a aquisição das imagens no tempo tem um papel muito importante para acompanhar o fenômeno em estudo.

A fase diferencial medida é composta por contribuições da fase da topografia não compensada, da deformação da superfície, do atraso de fase atmosférica, do erro de órbita e do ruído. Desta forma, a fase diferencial medida pode ser expressa como:

$$f_{dpha} = f_{topo} + f_{defo} + f_{atm} + f_{orb} + f_{noise} \quad (4)$$

A partir da equação (4) notamos que a fase medida $f_{dpha}$ é contaminada com vários componentes, como a fase atmosférica, a fase orbital, a fase topográfica e o ruído de fase. Como o objetivo é separar o componente de fase de movimento $f_{defo}$ dos demais, a técnica PInSAR utiliza modelagem de dados, procedimentos de análise e tratamentos estatísticos

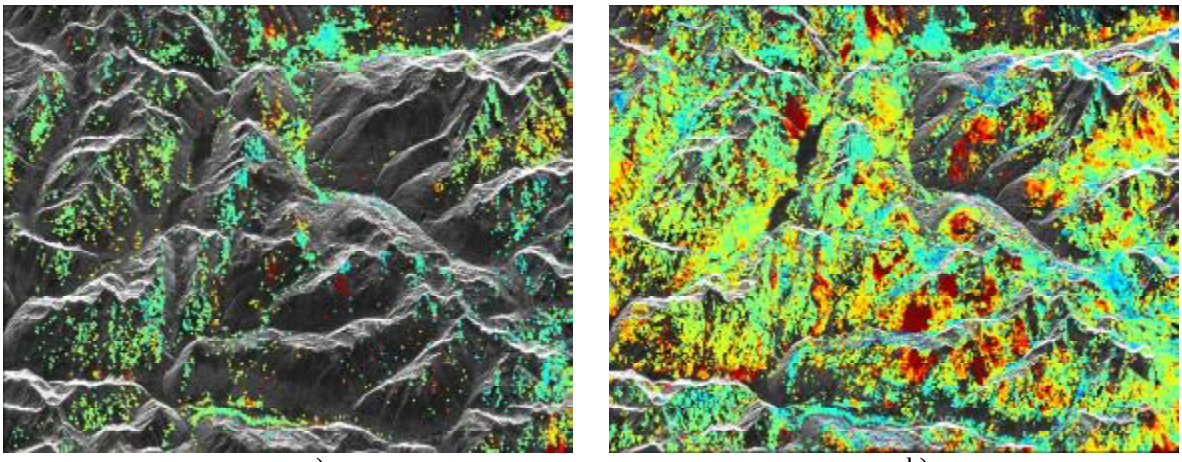
apropriados, que permite a estimativa dos diferentes parâmetros possíveis utilizando o *stack* de imagens . Por modelagem adequada da componente de fase, devido ao movimento do terreno, é possível estimar a evolução temporal e espacial da deformação. Muitas vezes, a evolução temporal da deformação é modelada por funções lineares (Ferretti et al, 2001).




a) b)

Figura 6 –a) Configuração de linha base para 4 aquisições; b) Amostragem temporal pela técnica DInSAR (Fonte: Crossetto et al., 2005).

Um novo algoritmo conhecido como SqueeSAR foi recentemente apresentado (Ferretti et al., 2011) para tratar com espalhadores persistentes (PS), juntamente com espalhadores distribuídos (DS), com o objetivo de superar os limites da técnica PSInSAR. Esta nova técnica tem em conta o diferente comportamento estatístico para PS e DS, e podem ser processados em conjunto sem a necessidade de alterações significativas na cadeia tradicional PSInSAR processamento, aumentando a capacidade de deteção de do movimento superficial. O potencial desta tecnologia de ponta pode ser destacada com dois exemplos de mapas de deformação com base no algoritmo PSInSAR e SqueeSAR (Figuras 7a e 7b).



a) b)

Figura 7- a) Mapa de deformação dos Alpes por PSInSAR; b) Mapa de deformação dos Alpes por SqueeSAR (65 cenas Radarsat-1). Fonte: TRE-Itália.

**2.3 Subconjuntos de pequenas linhas-base (SBAS)**

A técnica de subconjunto de pequenas linhas de base (SBAS) é um algoritmo de DinSAR que emprega a técnica dos mínimos quadrados para detectar a deformação da superfície do solo e analisar a sua evolução temporal, gerando mapas de deformação e velocidade média.

Berardino et al. (2002) propôs a técnica SBAS, em que uma combinação de várias séries de interferogramas SAR gerados por uma seleção adequada dos pares de SAR de dados é utilizada para fornecer um mapa denso de medidas de deformação. Os pares são caracterizados por uma pequena separação espacial e temporal (linha de base) entre as órbitas

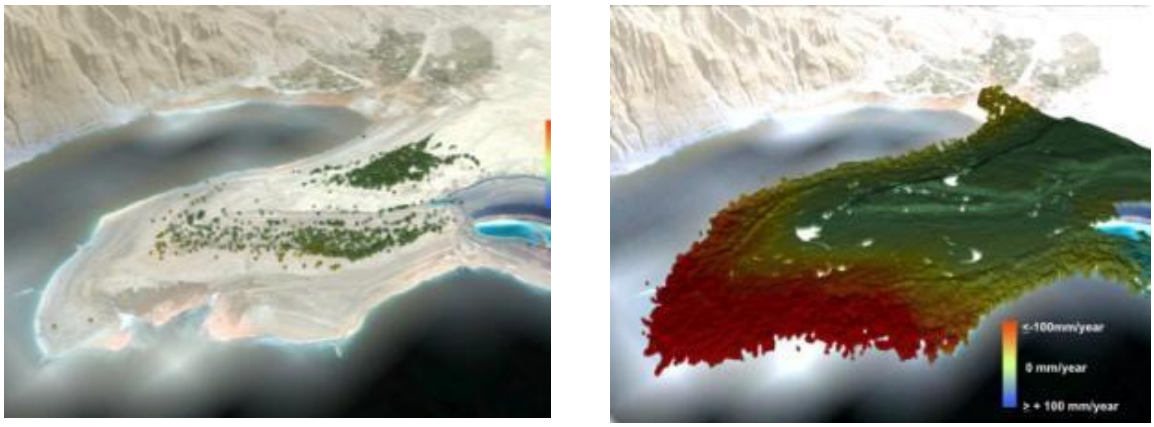
de aquisição, aumentando a amostragem temporal usando todas as aquisições de diferentes subconjuntos de base pequena e preservando a capacidade do sistema.

A técnica SBAS na resolução espacial máxima (10 x 10m) tem sido também amplamente aplicada em estudos da deformação de estruturas feitas pelo homem, tais como edifícios, reservatórios, usinas etc (Lanari et al., 2004). O ponto-chave da técnica SBAS, além de empregar interferogramas multilook, é a escolha pares de imagens SAR de partida envolvidos na geração do interferograma, de forma a minimizar a linha de base espacial, reduzindo assim o fenômeno descorrelação e os erros topográficos.

O primeiro passo do processo requer a avaliação da filtragem passa-baixa na direcção de *range* da fase diferencial, o qual pode incluir padrões espaciais de larga escala de deformação, erros topográficos causados pela falha no modelo de elevação digital utilizada, e possíveis contribuições causadas por heterogeneidades atmosféricas entre aquisições (muitas vezes referida como artefatos fase atmosférica).

Depois de subtrair as componentes espaciais de baixas frequências, os padrões de fase residual, obtidos a partir dos interferogramas entre os dados temporais estão relacionados com a deformação da superfície de alta-frequência. Estas características permitem minimizar alguns efeitos (como decorrelação ruído espacial e temporal) que mascaram os dados, aumentando o número de pontos por unidade de área, cujo objetivo é fornecer medições de deformação confiáveis. Os produtos obtidos por este método são caracterizados por uma elevada densidade de pontos espacialmente monitorados, com uma precisão de até 1 mm/ano nas medidas de velocidade de deformação média, e cerca de 5 mm sobre as medidas de deformação (Lanari et al., 2004).

Alguns exemplos de sucesso na aplicação da técnica SBAS são o monitoramento do Monte Etna, Vesúvio, Pico Teide (Fernandez et al, 2009), Campi Flegrei (Trasatti et al, 2008.). A Figura 10 apresenta um exemplo de aplicação utilizando as técnicas PSInSAR e SBAS na península de Lisa (Mar Morto).




a) b)

Figura 10: a) Técnica PSInSAR; b) técnica SBAS. Fonte: SARMAP

Uma evolução da técnica SBAS, é o trabalho desenvolvido por Trasatti et al,(2008), que utilizou dados de diferentes sensores com a mesma gemotria de iluminação para estender a série temporal e obter uma análise da deformação para intervalos de tempo maiores. No estudo realizado, foram utilizados dados dos satélites ERS-1 e ERS-2 (lançados em 1991 e 1995), bem como os dados do sensor de ENVISAT. Esta técnica foi aplicada com sucesso na análise da deformação em zonas propensas como vulcânica, sísmica antrópica etc.

A técnica SBAS apresenta uma característica interessante, que mesmo empregando apenas oito imagens continua proporcionando resultados aceitáveis, ao invés de utilizar o mínimo exigido de 20 imagens pela técnica PSInSAR

## 3 Comparação entre as técnicas

Atualmente os softwares que realizam a técnica PinSAR podem trabalhar tanto com a coerência ou critérios de amplitude de seleção de base. A escolha do critério de seleção depende da aplicação. Os métodos baseados em coerência trabalham com períodos bem mais longos em áreas coerentes, como áreas urbanas, suburbanas e industriais. A coerência de um dado pixel é estimada através de uma janela centrada no mesmo pixel, se um único alvo é muito coerente está localizado numa área muito ruidoso, terá um valor de coerência estimada baixo. Isto não ocorre se for utilizado um critério de amplitude, que funciona em resolução plena e que seleciona o pixel sem considerar os pixels vizinhos (Crossetto et al., 2005).

A Tabela 1 apresenta um resumo das características das técnicas e verifica-se que a utilização do DInSAR é muito limitada para monitoramento de processos de deformação, devido as correções atmosféricas necessárias e o ruído. As demais técnicas permitem o monitoramento temporal do fenômento com correção doefito atmosférico, mas a técnica PSInSAR não permite a obtenção de medidas de deformação como no SqueeSAR e SBAS. Um aspecto a ser considerado é a necessidade de um DEM atualizado da área de estudo, para que seja possível a estimativa do erro topográfico e permitir um melhor posicionamento geográfico dos PS nas imagens. A quantidade de imagens e a periodicidade de aquisição dependerá da necessidade da aplicação.

Tabela 1 – Comparação de características:

| ***Técnica:*** | ***Principais características:*** |
|---|---|
| DinSAR | Interferometria com modelo de elevação digital (DEM) removido;<br>Informação qualitativa, distribuída em deformação do solo;<br>Gravemente afetado por efeitos atmosféricos e de ruído;<br>Não provê nenhum série temporal. |
| PSInSAR | Explora alvos terrestres estáveis – Espalhadores permanentes (PS)<br>Estima efeitos atmosféricos e a sua remoção<br>Provê uma série temporal<br>Não provê medidas de espalhadores homogêneos distribuídos (DS)<br>Necessita de pelo menos 20 imagens. |
| SqueeSAR | Explora alvos terrestres estáveis – Espalhadores permanentes (PS)<br>Provê medidas de espalhadores homogêneos distribuídos (DS)<br>Estima efeitos atmosféricos e a sua remoção<br>Provê uma série temporal<br>Necessita de pelo menos 20 imagens. |
| SBAS | Explora alvos terrestres estáveis – Espalhadores permanentes (PS)<br>Estima efeitos atmosféricos e a sua remoção<br>Provê uma série temporal<br>Não provê medidas de espalhadores homogêneos distribuídos (DS)<br>Necessita de pelo menos 8 imagens. |

**Conclusões e comentários:**

Monitoramento de alta precisão de fenômenos de superfície de deformação com DInSAR evoluiu a partir da interpretação de poucos pares de imagens InSAR para a análise de séries temporais imagens InSAR. A análise de séries temporais tem permitido reduzir os artefatos causados por diversos fatores (anomalias atmosféricas, erros de órbita, perda de medidas de coerência), melhorando a precisão da medição de deformação.

Técnicas avançadas DInSAR como PSinSAR e SBAS foram propostas para superar os inconvenientes da análise DInSAR convencional e são poderosos instrumentos para o monitoramento dos fenômenos de deformação da superfície, com uma precisão de centímetros ou sub-centímetro utilizando sensores nas bandas C e X, e de alguns centímetros para sensores na banda L.

As principais aplicações das técnicas estão relacionadas aos transportes (estradas, ferrovias, túneis atividades, pontes, dutos), à mineração (monitoramento de estabilidade a céu

aberto e subterrâneo) aos reservatórios de petróleo/gás, à riscos naturais (deslizamentos de terra, e instabilidades do solo), à energia (usinas, barragens e reservatórios) e ao urbanismo (edifícios, e extração de água do solo, mitigação de inundações, disputas legais).

Com as constelações atuais de satélites SAR (Cosmo e TerraSAR) e a proposta da constelação RADARSAT (Mission Constellation), é razoável supor que, no futuro próximo haverá satélites que fornecerão quase diariamente dados SAR, o que irá expandir drasticamente as capacidades DInSAR na detecção de superfície e monitoramento.

**Agradecimentos:**

Os autores gostariam de agradecer (1) Monserrat Oriol, do Instituto de Geomática, Castelldefels/Espanha, pelo resultado DInSAR na mineração Solsona, (2) Alessandro Ferretti e Alastair Belson da TRE srl, Milão/Itália, pelos resultados SqueeSAR de Londres e Itália, e (3) Paolo Pasquali e Francesco Holecz da Sarmap, Purasca/Suíça, pelos o resultados SBAS na Península de Lisa. Agradecimentos especiais ao CNPq pelo subsídio recebido pelo segundo autor (Processo n º 304254/2009-6).

## Referências bibliográficas

Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms, **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, v. 40, p. 2375–2383.

Crosetto, M.; Crispa, B.; Biescas, E.; Monserrat, O.; AGUDO, M.; FERNANDES, P.; 2005. Land Deformation Monitoring Using SAR Interferometry: state-of-the-art. **Photogrammetr fernerkundung geoinformation**, v. 6, p. 497-510.

Ferretti, A. 1999. Permanent scatterers in SAR interferometry, Proc. International Geoscience Remote Sensing Symposium., Hamburg, Germany, p.1528-1530.

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

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

Fernandez, J.; Tizanni, P.; Manzo, M., Borgia, A.; Gonzalez, P. J.; Marti, J.; Pepe A.; Camacho A. G.; Casu, F.; Berardino, P.; Prieto, J.F.; Lanari R. 2009. Gravity-driven deformation of Tenerife measured by InSAR time series analysis, **Geophysical Research Letters**, v. 36, p. L04306.

Gabriel, A. K.; Goldstein, R. M.; Zebker, H.A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, vol. 94. n. B7, p. 9183–9191.

Goldstein, R. M.; Engelhardt, R.; Kamp, B.; Frolich, R. M. 1993.Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream. **Science**, v. 262, p. : 1525–1530.

Massonnett, D.; Briole, P.; Arnaud, A. 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. **Nature**, V.375, p. 567–570.

Massonnett, D.; Feigl, K. L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. **Reviews of Geophysics**, V. 36, n. 4: p. 441–500.

Lanari, R.; Lundgren, P.; Manzo, M.; Casu, F. 2004. Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California, **Geophysical Research Lette**r, v. 31, n. 23, p. L23- 613.

Trasatti, E.; Casu, F.; Giunchi, C., Pepe, S., Solaro, G.; Tagliaventi, S.; Berardino, P.; Manzo, M.; Pepe, A.; Ricciardi, G. P.; Sansosti, E.; Tizzani, P.; Zeni, G.: Lanari, R. 2008. The 2004–2006 uplift episode at Campi Flegrei caldera (Italy): Constraints from SBAS-DInSAR ENVISAT data and Bayesian source Inference, **Geophysical Research Letters**, v. 35, p.L07308.

Zebker, H. A.; Villasenor, J. 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959.