

INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL COM DADOS SAR: PRINCÍPIOS BÁSICOS E APLICAÇÕES EM GEOCIÊNCIAS

P. Negrão¹, J. Gerente¹, F. F. Gama¹, J. C. Mura¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

Comissão IV - Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Interpretação de Imagens

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a descrição dos princípios básicos da técnica de interferometria diferencial de dados SAR (DInSAR), bem como a apresentação de seu potencial para aplicação em diversos trabalhos de geociências. Com este trabalho, constatou-se que nas últimas duas décadas houve inúmeros avanços e trabalhos desenvolvidos com esta técnica. No Brasil, trabalhos continuam sendo desenvolvidos para aplicações em detecção de deslocamentos superficiais em áreas de mineração. A possibilidade de utilizar a técnica para monitoramento de grandes áreas, com precisão adequada e sem a necessidade de visita a campo é um dos fatores que a torna atrativa para as geociências. A perspectiva é que a técnica continue a ser disseminada, uma vez que existem diversas missões ativas para provimento de dados SAR e o satélites Sentinel-1 (A e B) fornecem dados gratuitos.

Palavras chave: DInSAR, monitoramento de superfícies, geociências

ABSTRACT

This paper aims to describe the basic principles of differential interferometry SAR (DInSAR) technique and to introduce its potential for application in several geosciences fields. It was verified that in the last two decades there have been numerous advances and researches developed with this technique. In Brazil, researches continue to be developed for many applications such as to detect surface displacements in mining areas. The possibility of using DInSAR to monitor large areas remotely with adequate accuracy is one of the factors that makes it attractive to geosciences studies. Future perspective is that the technique will continue to be disseminated, since there are several active missions to provide SAR data and the Sentinel-1 satellites (A and B) provides free data.

Keywords: DInSAR, surface monitoring, geosciences

1- INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas houve um expressivo aumento do uso de radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) a bordo de plataformas orbitais e suborbitais. A técnica denominada Interferometria utilizando imagens SAR (InSAR) baseia-se na diferença de fase entre *pixels* homólogos de duas imagens SAR complexas, co-registradas e adquiridas com diferentes geometrias e/ou em instantes distintos. Através dessa diferença de fase, ou fase interferométrica, é possível obter a altitude do terreno imageado. Para a aquisição dessas imagens, duas antenas podem ser transportadas na mesma plataforma (*single-pass interferometry*) ou uma única antena pode sobrevoar duas vezes a mesma área (*repeat-pass interferometry*) (Gabriel et al., 1989).

A técnica InSAR permite a obtenção de posições tridimensionais com precisão, muitas vezes,

melhores que aquelas obtidas por estereoscopia de imagens ópticas, uma vez que detecta diferenças de fase de metade do comprimento de onda do SAR. A técnica para essa finalidade foi demonstrada com sucesso pelo autor Graham (1974), entre outros, e já foi amplamente empregada para a geração de produtos como modelos digitais de elevação (MDE). Exemplos de missões que geraram MDE são o TOPSAR, descrito por Zebker et al. (1992), o SRTM, descrito por Farr e Kobrick (2000) e também o TanDEM-X, sendo que os dois últimos produziram MDEs com um recobrimento quase integral da superfície terrestre.

Derivada da InSAR, desenvolveu-se a Interferometria Diferencial SAR (*Differential SAR Interferometry - DInSAR*), que através de, no mínimo, duas imagens SAR adquiridas em instantes distintos, detecta deslocamentos na linha de visada do radar (*line of sight - LoS*) ocorridos entre as aquisições.

A primeira apresentação de resultados experimentais da DInSAR, para detecção de pequenas mudanças (1cm ou menos) na elevação, em grandes superfícies (faixas de 50km) foi feita pelos autores Gabriel et al. (1989), os quais utilizaram imagens SAR do satélite Seasat e mostraram a possibilidade de aplicação da técnica para a detecção de deslocamentos causados por diversos fenômenos geofísicos, como dilatação e flambagem em zonas de falhas, deslocamentos residuais de eventos sísmicos, entre outros.

A DInSAR proporciona uma visão abrangente do fenômeno do deslocamento superficial e por isso tem sido amplamente aplicada em estudos de sismologia, vulcanologia, glaciologia, deslizamentos de terra e outros estudos geotécnicos e geofísicos de fenômenos que ocorrem em largas escalas. Devido à sua acurácia, esta técnica se tornou uma ferramenta de monitoramento quantitativo e não apenas qualitativo, e dependendo da aplicação, ela se mostra uma alternativa eficaz aos métodos topográficos e geodésicos clássicos.

Tanto a InSAR quanto a DInSAR podem ser realizadas com dados SAR aerotransportados e orbitais. No entanto, para aplicações em detecção de deslocamentos na superfície em grandes extensões territoriais, os sistemas orbitais são os mais utilizados, não apresentando papel significativo, neste contexto, os sistemas aerotransportados. Além disso, com o advento da aquisição sistemática de dados SAR por sistemas orbitais, desenvolveu-se as técnicas avançadas de DInSAR (A-DInSAR), que utilizam séries temporais dessas imagens.

Dada a alta empregabilidade da DInSAR nas geociências, tanto em sua forma padrão quanto realizada de forma avançada, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão dos princípios básicos envolvidos na técnica, a disponibilidade de imagens para a sua realização e alguns exemplos de trabalhos desenvolvidos.

2- PRINCÍPIOS BÁSICOS

Como mencionado na seção 1, a Interferometria SAR (InSAR) baseia-se em diferenças de fase de pelo menos duas imagens SAR complexas (*Single Look Complex* - SLC) adquiridas a partir de diferentes geometrias e/ou em momentos diferentes de alvos na superfície da Terra. A diferença de fase, ou fase interferométrica, é calculada pela Equação 1.

$$\phi_{\Delta t} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

Na Equação 1, $\phi_{\Delta t}$ é a diferença de fase, λ é o comprimento de onda do SAR e ΔR é a diferença de distância entre o alvo e o SAR, entre as duas aquisições.

Uma imagem InSAR, também conhecida como interferograma, é criada a partir do co-registro de duas imagens SAR e pelo cálculo da diferença entre seus valores de fase correspondentes *pixel a pixel*. O interferograma apresenta um ciclo repetitivo da fase de 0 a 2π e é caracterizado por padrões denominados franjas (Mura, 2000). No entanto, o intervalo total de diferenças entre duas observações que a fase representa, pode ser de vários múltiplos do comprimento de onda do sinal, ou, expresso em termos de fase, vários múltiplos de 2π (Paradella et al., 2012). Sendo assim, para estimar uma determinada grandeza a partir do interferograma é necessário submetê-lo ao processo de desdobramento de fase (*phase unwrapping*).

Para caracterizar a qualidade de um interferograma utiliza-se a correlação interferométrica, ou coerência, que é uma medida da variância da fase interferométrica (Zebker et al., 1992). A decorrelação, ou seja, a perda da coerência interferométrica, é uma significativa limitação da InSAR. A decorrelação temporal ocorre devido a mudanças nas características nos alvos com o tempo. A decorrelação espacial impede a interpretação de fases interferométricas para alvos em pares com longas linhas de base espacial. Além disso, a baixa coerência pode resultar em problemas de desdobramento da fase (Werner et al., 2003).

A Figura 1 mostra a geometria de aquisição de imagens SAR para interferometria. Nela, SAR 1 e SAR 2 representam as antenas SAR, B é a linha de base (distância entre SAR 1 e SAR 2), B_{\perp} a linha de base perpendicular (ou normal), R_1 e R_2 são as distâncias das antenas SAR 1 e SAR 2, respectivamente, ao ponto P de altitude h em uma superfície e ΔR é a diferença entre essas distâncias.

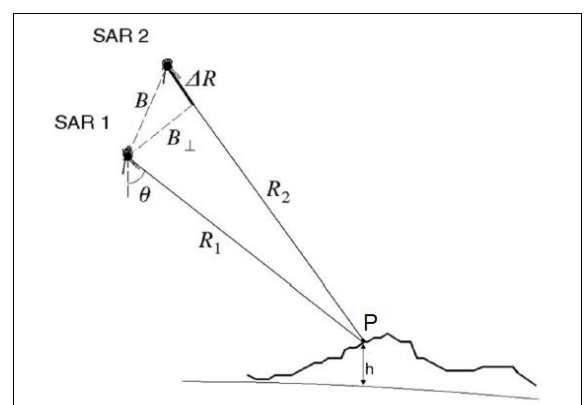


Fig. 1 – Geometria de aquisição de imagens para InSAR. Fonte: (Paradella et al., 2015).

Analisando a Figura 1 nota-se que é possível determinar a altitude de um alvo a partir de duas imagens adquiridas com geometrias diferentes, uma vez que as posições de SAR 1 e SAR 2 são conhecidas e R é o *range* (distância alvo-sensor) que é calculado em função do comprimento de onda. Nos sistemas

orbitais, essas posições encontram-se descritas nas efemérides do satélite.

Uma variação na altitude do alvo imageado causa uma variação em ΔR e, conseqüentemente, em $\phi_{\Delta r}$. A detecção dessas variações, ocorridas no intervalo de tempo entre duas aquisições, é o princípio da DInSAR.

Como na DInSAR o objetivo é determinar o deslocamento (ϕ_{dr}), é necessário então isolar essa componente das demais contribuintes à fase interferométrica ($\phi_{\Delta r}$). A componente topográfica pode ser simulada a partir de um MDE disponível, se houver, ou então pode ser utilizada três imagens SAR da mesma área para obter a topografia com o primeiro par interferométrico e subtraí-la do segundo para isolar a movimentação. Essa simulação é feita também com a informação das posições das órbitas do satélite.

Realizando a subtração da fase topográfica simulada, a fase interferométrica restante é função da fase devido ao deslocamento do solo (ϕ_{dr}) entre as aquisições, além de outras componentes de fase indesejáveis, e está representada pela Equação 2.

$$\phi_{\Delta r} = \phi_{dr} + \phi_h + \phi_{atm} + \phi_\beta + \phi_\eta \quad (2)$$

Na Equação 2, ϕ_{dr} é a variação de fase devido ao deslocamento do pixel na direção da LoS, ϕ_h é a componente de fase residual devido a erros na simulação da fase topográfica, ϕ_{atm} é a contribuição da atmosfera, ϕ_β responsável por atrasos no sinal, é a componente de fase devido a erros de órbita e ϕ_η representa o ruído de fase.

A DInSAR proporciona uma abrangente visão da movimentação detectada para toda a área estudada (Rosen et al., 2000). No entanto, diversos fatores comprometem a qualidade de seus resultados. As maiores limitações se dão essencialmente pelas decorrelações temporal e geométrica e heterogeneidades atmosféricas. A decorrelação temporal torna as medidas interferométricas impraticáveis em áreas de vegetação ou em áreas compostas por alvos cujas propriedades elétricas, ou cujas posições se alterem com o tempo. A decorrelação geométrica limita o número de pares de imagens adequados para interferometria e impede a total exploração do conjunto de dados disponíveis. A heterogeneidade atmosférica em cada aquisição pode comprometer a acurácia do monitoramento da deformação (Massonnet e Feigl, 1998; Ferretti et al., 2001).

Com o lançamento do satélite ERS-1 da Agência Espacial Europeia (ESA), em 1991, uma grande quantidade de dados SAR adequados para

interferometria se tornou disponível, o que permitiu o desenvolvimento das técnicas avançadas de interferometria diferencial. Essas técnicas avançadas são realizadas com séries temporais de dados SAR e são denominadas de A-DInSAR (*Advanced Differential SAR Interferometry*). As A-DInSAR representam um avanço em relação à abordagem padrão de DInSAR, com um par de imagens, tanto em termos de capacidade de modelagem da deformação quanto em termos de qualidade da estimativa de deslocamentos.

As técnicas A-DInSAR realizam uma exploração sistemática de séries de imagens SAR com o objetivo de detectar deformações em superfície, lidando com os problemas de decorrelação e efeitos atmosféricos (Colesanti et al., 2003). Um dos principais produtos gerados com as A-DInSAR é o mapa de velocidade de deslocamento.

Para derivar estimativas de deformação é necessário explorar apenas os *pixels* caracterizados por baixo nível de ruído, os quais são selecionados segundo um critério, que pode ser a coerência interferométrica, a dispersão da amplitude do sinal, ou outro. Abordagens que se baseiam na dispersão da amplitude do sinal constituem uma importante classe de A-DInSAR, que é a Interferometria por Espalhadores Persistentes (*Persistent Scatterer Interferometry* – PSI). A PSI foi apresentada pelos autores Ferretti et al. (2000) e desde então recebeu inúmeras contribuições de diversos autores.

De maneira geral, as técnicas A-DInSAR variam em configurações de linhas de base, critérios de seleção de *pixel* e modelos de deformação para se adaptar a aplicação desejada. Atualmente, os *software* para interferometria diferencial não realizam apenas um tipo de método ou abordagem e são flexíveis em relação aos parâmetros escolhidos para seleção de *pixels*, entre outras restrições ponderadas. A escolha desses parâmetros depende do tipo de aplicação e também da região de estudo.

3- DISPONIBILIDADE DE DADOS SAR PARA INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL

Há várias missões ativas de satélites com sensores SAR com diferentes tempos de revisita que fornecem dados para realizar interferometria. O satélite TerraSAR-X e a constelação de quatro satélites Cosmo-SkyMed possuem sensores que operam na banda X, de comprimento de onda de 3,1cm. Operando na banda C, de comprimento de onda de 5,6cm, há a constelação de dois satélites Sentinel-1 (A e B) e o satélite Radarsat-2. É importante também ressaltar que as imagens Sentinel-1 possuem disponibilidade gratuita. Já operando na banda L, de 23,6cm de comprimento de onda, tem-se o ALOS PALSAR-2. Além dos dados provenientes dessas missões espaciais, é possível também realizar a técnica A-DInSAR com dados de SAR aerotransportados, no entanto, para

trabalhos em grandes extensões territoriais e com alta amostragem do fenômeno da deformação o custo é elevado.

4- APLICAÇÕES EM GEOCIÊNCIAS

As aplicações das técnicas DInSAR, e A-DInSAR, são variadas, como monitoramentos de movimentações em ambientes de mineração, deformações vulcânicas, terremotos, subsidência em cidades populosas devido à retirada de água subterrânea, movimentos de superfície devido a obras civis ou movimentos de massa, entre outras. As aplicações exploram as principais vantagens da técnica, que são: cobertura espacial de áreas extensas; alta sensibilidade a pequenas deformações; capacidade de medir deformações passadas a partir de séries históricas de imagens SAR e; redução na quantidade de observações terrestres, o que simplifica as operações logísticas, o tempo e os custos operacionais quando comparado com os levantamentos topográficos clássicos.

Diversos trabalhos foram e estão sendo desenvolvidos utilizando DInSAR e A-DInSAR, tanto no Brasil como em outros países. No Brasil, pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e colaboradores realizaram diversos trabalhos utilizando séries temporais de imagens TerraSAR-X para detecção de deslocamentos em minas de ferro e manganês a céu aberto na Província Mineral de Carajás, bem como em minas de ferro a céu aberto na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero.

Um exemplo de trabalho desenvolvido no Brasil é o dos autores Temporim et al. (2017), que aplicaram a técnica PSI com uma série de 33 imagens do sensor TerraSAR-X, abrangendo o período de março de 2012 a abril de 2013, para monitoramento de deslocamentos superficiais na mina de ferro a céu aberto N5E, pertencente à mineradora Vale S.A. e localizada na Província de Carajás, região amazônica. Nesse trabalho, os autores determinaram o

deslocamento em LoS e compararam os resultados com medidas efetuadas em campo através de levantamentos topográficos. Os resultados mostraram aderência entre os valores de deformação obtidos com a PSI e com topografia.

Dentre os trabalhos a nível internacional, pode-se citar o de Peltier et al. (2010), que utilizaram a técnica PSI para monitorar a deformação de terrenos situados na área do vulcão ativo Piton de la Fournaise, comparando uma série histórica com pontos coletados em campo com levantamentos GNSS.

Os autores Lagios et al. (2011) estudaram a relação entre padrões de deformação sísmica em uma área de borda tectônica na Grécia, medidos com GPS diferencial (DGPS), e estimados por meio de uma série histórica (1992 à 2008) de imagens SAR.

Osmanoglu et al (2010) aplicaram a técnica de PSI para estudar uma subsidência na cidade do México associada à retirada de água subterrânea. Foram utilizadas 23 cenas Envisat ASAR (banda C) adquiridas entre Janeiro de 2004 e Julho de 2006 para processamento PSI, o qual foi validado com pontos contínuos de GPS (C-GPS) medidos por meio de nove estações espalhadas pela área. A comparação do PSI com os pontos GPS resultaram em uma acurácia melhor que $\pm 6,9$ mm/ano.

A Figura 2 apresenta o mapa de velocidade de deslocamento, em milímetros por ano, apresentado no trabalho dos autores Mura et al. (2017) e o gráfico com o deslocamento de dois *pixels* no tempo. Nesse trabalho, foi realizada uma investigação da deformação da superfície no entorno da barragem de Germano, localizada ao lado da barragem de Fundão, em Mariana-MG, com uma abordagem de A-DInSAR baseada no conceito de linhas de base curtas e uma série temporal de 15 imagens TerraSAR-X. As imagens compreendem o período de novembro de 2015 (pós rompimento da barragem de Fundão) a abril de 2016.

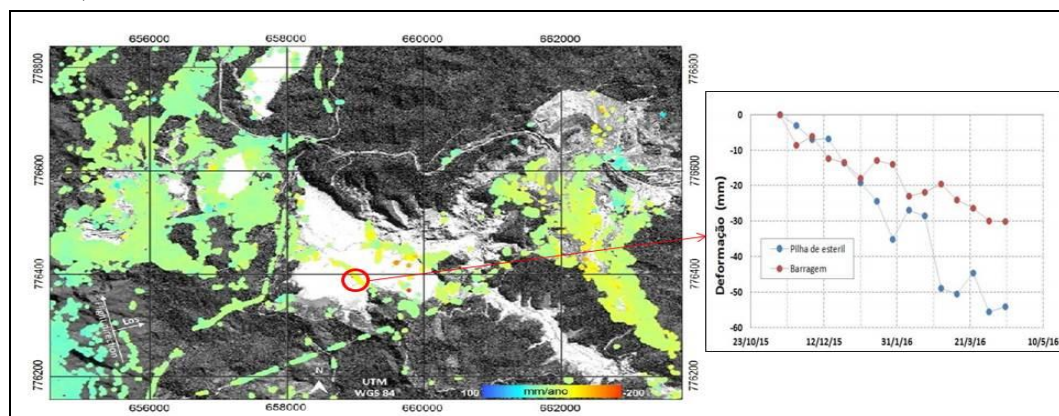


Fig. 2 – Exemplo de aplicação DInSAR para mineração. Fonte: (Mura et al., 2017)

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível constatar que a DInSAR foi amplamente aplicada nas duas últimas décadas em diversos trabalhos de geociências, como tectonismo, mineração, sísmica, entre outros. A perspectiva é que a técnica continue a se desenvolver e ser aplicada, uma vez que há diversas missões ativas, algumas delas com constelações de satélites, o que permite redução no tempo de revisita e, conseqüentemente, maior amostragem de um fenômeno de deslocamento. Além disso, a constelação de dois satélites Sentinel (1A e 1B) fornecem dados gratuitos, o que permite a uma maior comunidade a aplicação da técnica com esses dados. Fatores como alta precisão, curto período de tempo para obtenção da informação, a dispensabilidade de trabalhos de campo e a possibilidade de trabalhar com grandes extensões de áreas (e não pontualmente) tornam positivo, e cada vez mais atrativo, o uso destas técnicas para aplicações em geociências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Colesanti, C.; A. Ferretti; F. Novali; C. Prati e F. Rocca, 2003. Sar monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 41, Nº 7 PART I, p. 1685–1701.
- Farr, T. G. e M. Kobrick, 2000. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. Eos, transactions american geophysical union, Vol. 81, Nº 48, pp. 583–585.
- Ferretti, A.; C. Prati e F. Rocca, 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential sar interferometry. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 38, Nº 5, pp. 2202–2212.
- Ferretti, A.; C. Prati e F. Rocca, 2001. Permanent scatterers in sar interferometry. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 39, Nº 1, pp. 8–20.
- Gabriel, A. K.; R. M. Goldstein e H. A. Zebker, 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. Journal of geophysical research, Vol. 94, Nº B7, pp. 9183.
- Graham, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping, 1974. Proceedings of the IEEE, Vol. 62, Nº 6, pp. 763–768.
- Lagios, E.; P. Papadimitriou; F. Novali; V. Sakkas; A. Fumagalli; K. Vlachou e S. Del Conte, 2012. Combined Seismicity Pattern Analysis, DGPS and PSInSAR studies in the broader area of Cephalonia (Greece). Tectonophysics, Vol. 524, pp. 43-58.
- Massonnet, D. e K. L. Feigl, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of geophysics, Vol. 36, Nº 4, pp. 441.
- Mura, J.C., 2000. Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR, Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-8209-TDI/764), São José dos Campos, Brasil.
- Mura, J. C.; F. F. Gama; W. R. Paradella; W. S. Brandão e C. G. de Oliveira, 2017. Monitoramento de deslocamento de superfície na região de Mariana-MG baseado em interferometria diferencial SAR utilizando dados do satélite TerraSAR-X: Resultados preliminares, In Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos-SP, Brasil, pp. 4755-4763.
- Osmanoglu, B.; T. H. Dixon; S. Wdowinski.; E. Cabral-Cano e Y. Jiang, 2010. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 3, Nº1, pp.1-12.
- Paradella, W. R.; J. C. Mura; F. F. Gama e A. Ribeiro, 2012. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. Revista brasileira de cartografia, Vol. 64, Nº 6, pp. 797–811.
- Paradella, W. R.; J. C. Mura; F. F. Gama; A. R. Santos; M. Galo; P. O. Camargo; A. Q. Silva e G. G. Silva, 2015. Detecção e Monitoramento de Estabilidade de Taludes e Deformações Superficiais em Mina a Céu Aberto através de Técnicas Avançadas de Interferometria Diferencial de Radar: uma Avaliação nas Minas de Ferro de Carajás (N4E, N4W, N5W) Utilizando Dados do Satélite TerraSAR-X. Relatório Científico Final, Processo FAPESP 2010/51267-9. São José dos Campos: INPE.
- Peltier, A.; M. Bianchi; E. Kaminski; J. C. Komorowski; A. Rucci e T. Staudacher, 2010. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. Geophysical Research Letters, Vol.37, Nº12, L12301.
- Rosen, P. A.; H. Scott; I. R. Joughin; F. K. Li; S. N. Madsen; E. Rodríguez e R. M. Goldstein, 2000. Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, Vol. 88, Nº 3, pp.333-380.
- Temporim, F. A.; F. F. Gama; J. C. Mura; W. R. Paradella e G. G. Silva, 2017. Application of persistente scatterers interferometry for surface displacements monitoring in N5E open pit iron mine using TerraSAR-X data, in Carajás Province, Amazon region. Brazilian Journal of Geology, Vol. 47, Nº 2, pp. 225-235.
- Werner, C.; U. Wegmuller; T. Strozzi e A. Wiesmann, 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping. Igarss 2003 IEEE international geoscience and remote sensing symposium. proceedings, Vol. 7, Nº 1, pp. 4362–4364.
- Zebker, H. A.; S. N. Madsen.; J. Martin; G. Alberti; S. Vetrilla e A. Cucci, 1992. The topsar interferometric radar topographic mapping instrument. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 30, Nº 5, pp. 1595–1597.