



Monitoramento de deslocamento de superfície na região de Mariana-MG baseado em Interferometria Diferencial SAR, utilizando dados do satélite TerraSAR-X: Resultados Preliminares

José Claudio Mura
Fabio Furlan Gama
Waldir Renato Paradella
Waldiza Souza Brandão
Cleber Gonzales de Oliveira

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

VISIONA Tecnologia Espacial
CEP - 12247-016 - São José dos Campos - SP, Brasil
{waldiza.brandao,cleber.oliveira}@visionaespecial.com.br

Abstract. This work presents an investigation of surface displacement using Differential SAR Interferometry (DInSAR) time-series carried out in Mariana-MG region where the Fundão dam disaster occurred on the 5th of November 2015, aiming at provide useful information about ground movement for alarm, planning and risk assessment. DinSAR time-series analysis was performed using 15 TerraSAR-X images. The temporal ground displacement was retrieved by using Least-Squares (LS) solution based on Singular Value Decomposition (SVD) inversion method, as described in the SBAS (Small Baseline Subset) technique. The atmospheric phase artifacts were filtered out in the space-time domain and the DEM height errors were estimated based on the normal baseline diversity. Two software package were used in this analysis, the SARscape, based on SBAS approach, and the Gamma Remote Sensing, using the DTS (DInSAR Time-Series) approach, based on a modified version of the SBAS and a set of additional weighted constrain on the acceleration of the ground displacement. The results obtained with the two processing approach are shown as well as some questions related with characteristics of the analyzed area and the number of scenes used in this analysis.

Palavras-chave: DInSAR time-series, SBAS, deformação de superfície, TerraSAR-X, Mariana dam disaster

1. Introdução

Mineração de ferro a céu aberto ocupa áreas extensas incluindo porções de terreno adjacentes a cava da mina, barragens de rejeitos e pilha de material estéril. Instabilidade pode ocorrer nestas áreas devido ao movimento de massas de rochas, inclinação acentuada das bancadas da mina, chuvas e outros fatores que ocorrem em operações regulares neste tipo de mineração. Diversas barragens foram construídas para acomodar os rejeitos provenientes da extração de minério de ferro das minas na região do município de Mariana. O rompimento da barragem de Fundão, localizada no subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 km do centro de Mariana, Minas Gerais, ocorrido em 5 de novembro de 2015, é considerado o maior desastre socioambiental da história brasileira e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeitos. Neste contexto, o monitoramento das extensas áreas de mineração é de extrema importância para prover informações para análise de risco, alarme e planejamento.

A técnica de séries temporais de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR-TS) faz uso de múltiplas aquisições de imagens SAR ao longo do tempo, possibilitando a detecção da variação temporal dos fenômenos de deformações de superfície. Esta técnica utilizando o conceito de linha de base curta (SBAS - Small Baseline Subset), introduzida por Berardino et al. 2002, tem sido aplicada com sucesso (Lanari et al., 2004, Lee et al., 2008, Jiang et al., 2011, Samsonov et al., 2012, Gama et al., 2015). Uma variante da técnica SBAS, a DTS (DInSAR Time-Series) da empresa Gamma Remote Sensing, que utiliza um fator de limitação

na variação brusca da velocidade de deformação, visando a remoção da componente de fase da atmosfera, tem sido também aplicada com sucesso (Werner et al., 2012, Mura et al., 2014).

Este estudo apresenta uma aplicação da técnica de série temporal DInSAR para monitorar deslocamento de superfície na região de mineração do município de Mariana-MG, mais especificamente na área das barragens de Germano e Fundão, com o intuito de detectar possíveis deslocamento de terreno no período de dezembro de 2015 a abril de 2016, utilizando 15 imagens do satélite TerraSAR-X. Na próxima seção é apresentada a descrição particular da área de estudo. A técnica de série temporal DInSAR é apresentada na seção 3. Na seção 4 são apresentados os tipos de processamento realizados com duas abordagens, a SBAS (SARscape) e a DTS (Gamma Remote Sensing). Os resultados obtidos a partir das abordagens SBAS e DTS são apresentados na seção 5. Na seção 6 são apresentadas as conclusões, bem como algumas questões relacionadas às características da área analisada, e as restrições devido ao número reduzido de imagens utilizadas na análise.

2. Área de estudo

A área de estudo pertencente ao complexo minerário de Germano, no município de Mariana/MG onde estão localizadas as barragens de Germano, Fundão e Santarém, mostrado na Figura 1. Em todas as etapas da extração mineral (pesquisa, lavra, beneficiamento, infraestrutura, etc.) é consumido um grande volume de água que é despejado juntamente com resíduos em barragens de rejeito. No dia 05/11/2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão contendo 50 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro, trinta e quatro milhões de m³ desses rejeitos foram lançados no meio ambiente e 16 milhões restantes continuam sendo carreados, aos poucos, para jusante e em direção ao mar, já no estado do Espírito Santo (IBAMA, 2015). O subdistrito de Bento Rodrigues, que se localiza cerca de 2.5 quilômetros vale abaixo, foi quase completamente inundado e destruído pela enxurrada de lama que se seguiu após o desastre na barragem. Outros vilarejos e distritos situados no vale do rio Gualaxo também foram atingidos pela enxurrada.

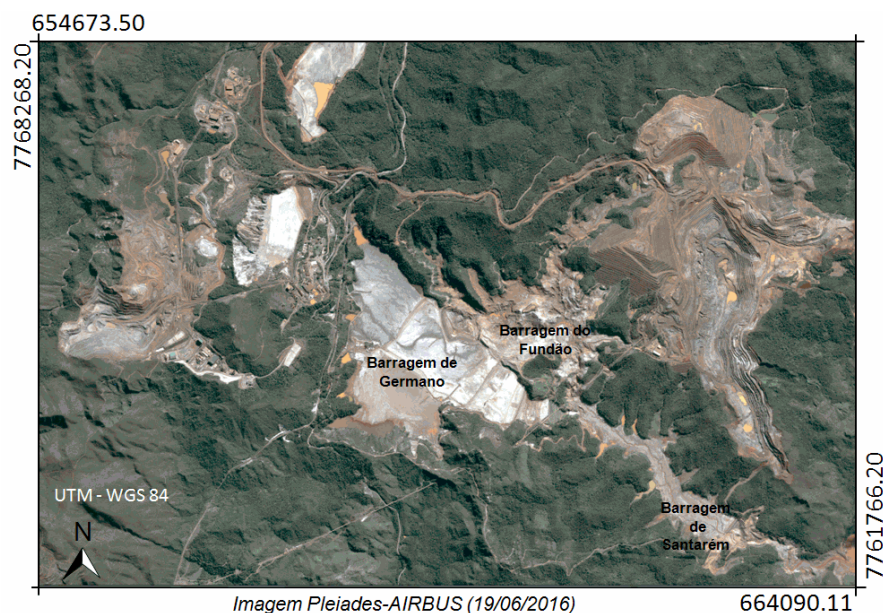


Figura 1. Área de estudo do complexo minerário de Germano – Mariana/MG.

3. Série temporal DInSAR

A técnica de Interferometria Diferencial (DInSAR) tem como objetivo medir deformações de superfície utilizando um par de imagens SAR, adquiridas em diferentes épocas e posição do satélite. O interferograma gerado a partir de duas imagens tem

componentes de fase devido às contribuições da topografia, deformações, atmosfera e ruídos. Conhecendo-se as posições das orbitas do satélite e a topografia da superfície, é possível subtrair a componente da fase topográfica do interferograma para medir deformações. Realizando este procedimento, a fase restante no interferogram diferencial é devida às contribuições do deslocamento do solo entre as aquisições, juntamente com outras componentes de fase indesejáveis, representada por:

$$\phi_{\Delta(x,r)} = \phi_{dr(x,r)} + \phi_h(x,r) + \phi_{atm(x,r)} + \phi_{\beta(x,r)} + \phi_{\eta(x,r)} \quad (1)$$

onde x e r são as coordenadas em azimute e alcance (range), ϕ_{dr} representa a variação de fase devido ao deslocamento do pixel na direção de visada do satélite (LoS), ϕ_h representa a fase residual da topografia, ϕ_{atm} representa o atraso da fase atmosférica, ϕ_{β} é a fase residual devido aos erros de orbita e ϕ_{η} representa o ruído de fase.

A análise temporal DInSAR é baseada em uma pilha de interferogramas diferenciais multi-referenciados (multi-look), gerados com base em um conjunto de $N+1$ imagens SAR adquiridas em ordem temporal (t_0, t_1, \dots, t_N), onde cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δt), como representado na equação (1).

Sendo M o grupo de interferogramas selecionados com base no limiar médio de coerência interferométrica e pela inspeção visual dos interferogramas desdobrados, e considerando um ponto de referência atribuído a uma área estável e um ponto genérico de coordenadas (x, r) , os valores de fase deste ponto em relação ao ponto de referência podem ser organizados em um vetor de M elementos, como

$$\phi_{ObML(x,r)}^T = [\phi_{\Delta t1(x,r)}, \phi_{\Delta t2(x,r)}, \dots, \phi_{\Delta tM(x,r)}] \quad (2)$$

O número de valores de fase desconhecidos (N elementos) relacionados ao deslocamento de um ponto genérico (x, r) na ordem temporal (t_0, t_1, \dots, t_N), considerando t_0 como a referência temporal (deformação zero), o vetor deslocamento pode ser representado por:

$$\phi_{Disp(x,r)}^T = [\phi_{dr1(x,r)}(t_1), \phi_{dr2(x,r)}(t_2), \dots, \phi_{drN(x,r)}(t_N)] \quad (3)$$

A relação entre o deslocamento (3) e os dados observados (2) pode ser representada como um sistema de M equações de N variáveis desconhecidas, na seguinte forma matricial:

$$A \phi_{Disp(x,r)} = \phi_{ObML(x,r)} \quad (4)$$

em que A é uma matriz de dimensão $N \times M$ de operadores de adição, subtração e ausência (1, -1, 0) entre os pares interferométricos. A solução do sistema de equações (4) pode ser obtida, no sentido de Mínimos Quadrados (LS) (Usai, 2002), por:

$$\phi_{Disp(x,r)} = A^+ \phi_{ObML(x,r)} \quad (5)$$

onde $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$ é a pseudoinversa de A .

O resultado de (5), ou seja, deslocamento de superfície no sentido da linha de visada do radar (LoS), pode apresentar algumas descontinuidades no intervalo de tempo em estudo, uma solução mais eficaz foi proposta por Berardino et al. (2002), através da minimização da norma do vetor velocidade de deslocamento, chamada de abordagem SBAS (Small Baseline Subset), onde a solução do sistema de equações é obtida através da aplicação do método SVD (Singular Value Decomposition) (Golub e Loan, 1989).

4. Processamento dos dados

O processamento dos dados foi realizado com 15 imagens SAR do satélite TerraSAR-X, no formato SLC, adquiridas entre 11 de Novembro de 2015 a 14 de Abril de 2016 a cada 11 dias, no modo ascendente e com um ângulo de incidência médio de 35° .

Duas abordagens de séries temporais DInSAR foram utilizadas nesta análise. A primeira chamada SBAS, implementada no software SARscape da empresa SARMAP, com uma característica de realizar o processo de desdobramento de fase (*phase unwrapping*) em três



dimensões conjuntamente, ou seja, espacialmente e temporalmente. A segunda abordagem utilizada foi a DTS implementada no software Gamma RS, derivada da técnica SBAS, que utiliza uma extensão do método SVD, juntamente com um conjunto de restrições para controlar a suavidade das soluções das séries temporais, visando a remoção das componentes de fase relacionada à atmosfera nos diversos interferogramas utilizados. A Abordagem DTS fornece também o erro do modelo de elevação utilizado.

O Modelo de Digital de Elevação (MDE) utilizado para remover a componente topográfica na análise DInSAR, foi provido pela empresa VISIONA Tecnologia espacial, baseado em triplete de imagens estereoscópicas coletadas pelo satélite Pleiades 1A no dia 19/06/2016, com resolução espacial de 0.5 metro.

4.1 Processamento dos dados com a abordagem SBAS

A técnica SBAS (*Small Baseline Subset*) é um algoritmo de séries temporais DinSAR que emprega a técnica de mínimos quadrados, através do método SVD (*Singular Value Decomposition*), para detectar deformações na superfície do solo e analisar sua evolução temporal, gerando mapas de deformação e de velocidade média de deslocamento superficial (Gama et al., 2015). Berardino et al. (2002) propuseram esta técnica para obter mapa de deformação superficial baseada na combinação de múltiplos interferogramas, gerados através de uma seleção adequada de pares de imagens SAR que apresentassem pequena linha de base espacial (separação espacial entre as órbitas da aquisição) e temporal.

Os interferogramas gerados neste processo formam uma rede redundante que interconecta as imagens de acordo com o tamanho das linhas de base espacial e temporal especificada. A fase dos interferogramas pode incluir padrões espaciais de deformação em grande escala, erros topográficos causados por falhas no MDE utilizado e possíveis contribuições causadas por heterogeneidades atmosféricas entre aquisições (muitas vezes referidas como artefatos de fase atmosférica). Depois de subtrair as componentes de baixa frequência espacial, os padrões de fase residuais obtidos, a partir dos interferogramas entre os dados temporais, são relacionados com a deformação de alta frequência da superfície. Este recurso permite minimizar alguns efeitos (como a decorrelação de ruído espacial e temporal) que contaminam os dados, aumentando o número de pontos por unidade de área onde o objetivo é fornecer medições confiáveis de deformação.

O processamento de dados foi realizado com o software SARscape, utilizando-se uma linha de base espacial máxima de 300 metros e linha de base temporal de 33 dias, utilizando como referência para correção a imagem adquirida em 17/01/2016. Algumas partes da infraestrutura visualizadas nas imagens foram utilizadas como pontos de referência estáveis para o processamento.

4.2 Processamento dos dados com a abordagem DTS

A coerência interferométrica para os dados do TSX-1 depende fortemente do intervalo de tempo entre as imagens que formam um par interferométrico, desempenhando um papel mais importante do que o tamanho da linha de base, como mostrado em Mura et al. (2014). Neste trabalho utilizou-se uma restrição nas linhas de base verticais de 350 metros (em módulo) e temporal de 33 dias, para gerar o conjunto de interferogramas para realização da análise.

Todos os interferogramas obtidos foram filtrados utilizando-se uma operação “multi-look”, utilizando-se uma janela de filtragem de 2x2, resultando em um pixel de dimensão de 1.8 por 3.8 metros em alcance e em azimute, respectivamente. Uma filtragem espectral adaptativa com tamanho de janela 32x32 pixels foi aplicada sobre os interferogramas para gerar as imagens de coerência interferométrica, segundo Goldstein et al. (1998). Regiões com coerência inferior a 0.4 foram desconsideradas. O processo de desdobramento da fase dos interferogramas foi realizado utilizando-se o algoritmo MCF (Minimum Cost Flow) proposto por Constantini (1998). Na presente análise utilizou-se o fator de suavização $\gamma = 1.6$.

5. Resultados e discussões

5.1 Resultados SBAS

O mapa de deslocamento superficial na linha de visada do radar (LoS) obtido através da abordagem SBAS é mostrado na Figura 5, com imagem de fundo do satélite Pleiades A1, apresentando padrões de estabilidade na maior parte da área analisada. Alguns setores apresentam deslocamentos negativos, principalmente nas pilhas de material estéril, que podem estar associados a recalques, como mostrado por Victorino et al. (2016) na área de Carajás, e na área da barragem de rejeito de Germano, podendo estar associados a subsidência. Contudo, uma investigação e correlação com dados de campo são recomendadas. Outro setor do mapa (inferior esquerdo) mostra um processo de alçamento (*up lift*), provavelmente devido a erros no processo de desdobramento da fase interferométrica dos interferogramas, bem como em possíveis erros de remoção das componentes de fase atmosférica durante o processamento. Estes problemas podem ter surgido devido às características da área, ou seja, de ser muito fragmentada e também pelo fato da utilização de um número relativamente pequeno de imagens SAR, ou seja, apenas 15 imagens.

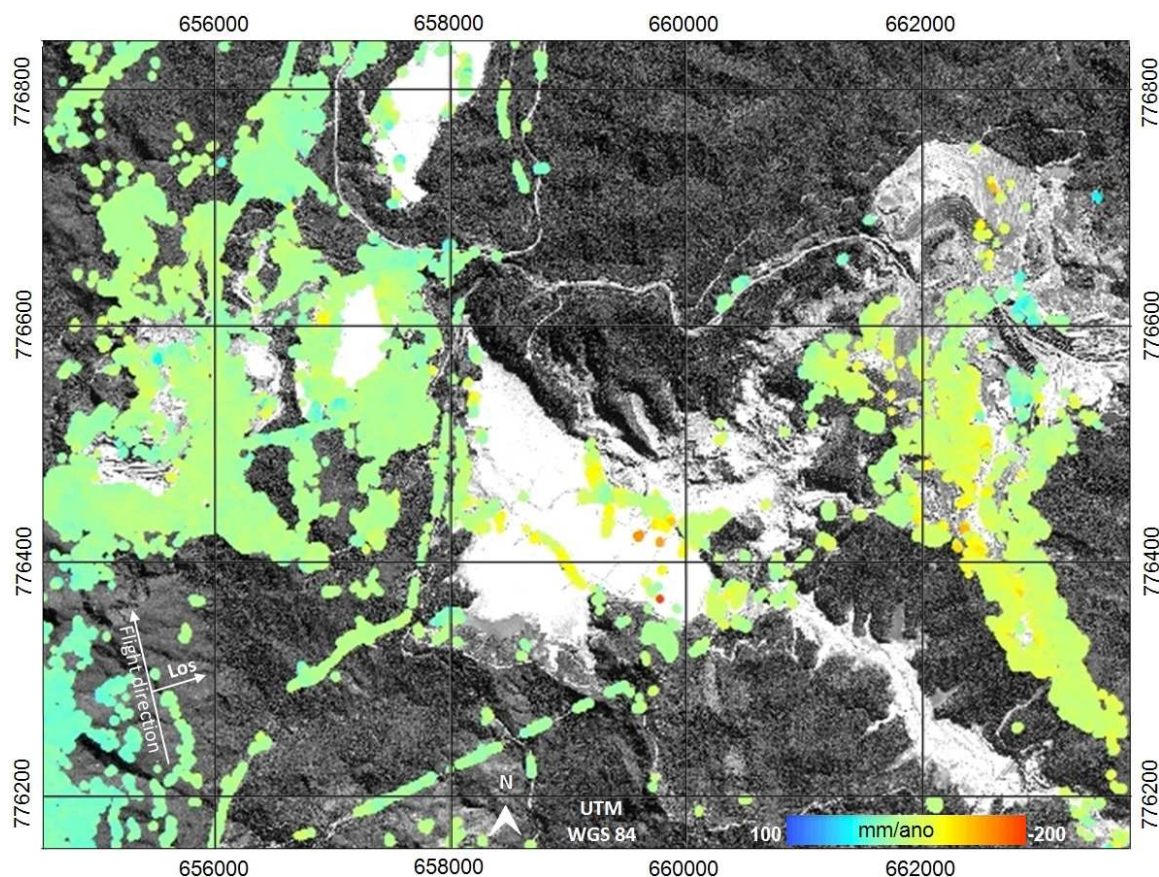


Figura 5. Mapa de velocidade de deslocamento de superfície na direção da linha de visada do satélite TerraSAR-X (LoS), obtido pela abordagem SBAS no período de 11/11/2015 a 14/04/2016, com imagem de fundo coletada pelo satélite Pleiades 1A em 19/06/2016.

Na Figura 6a nota-se um processo de subsidência na região da barragem de Germano, com deslocamento superficial acumulado da ordem de -30 mm em LoS durante o período analisado, cujas causas devem ser investigadas e que podem ser indicativas da presença de discontinuidades (trincas). Na pilha de estéril mostrada na Figura 5, foram obtidos valores de deslocamento acumulado de até -54 mm, que podem ser associados à presença de recalques,

normalmente esperado neste tipo de estrutura mineira. A ausência de informações de campo (p. ex. medidas topográficas) não permite mais especulação. A Figura 6b mostra os gráficos com os valores de deslocamento destas duas áreas (barragem e pilha de estéril).

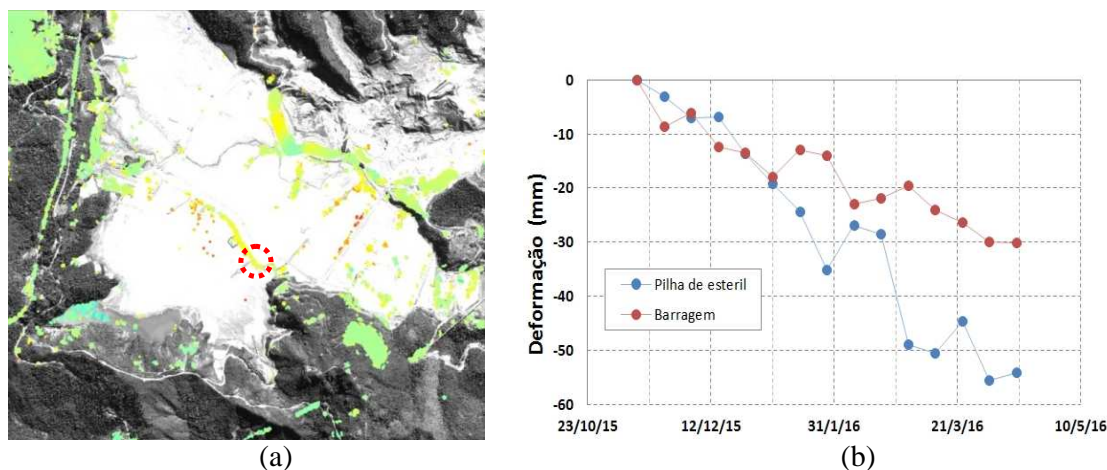


Figura 6. Deslocamento superficial acumulado de -30 mm na barragem de Germano (a), gráficos de deslocamento na linha de visada do radar (LoS), durante o período analisado.

O mapa de deslocamento superficial obtido através da utilização da abordagem DTS é mostrado na Figura 7, com imagem de fundo do satélite TerraSAR-X, apresentando padrões de estabilidade na maior parte da área analisada.

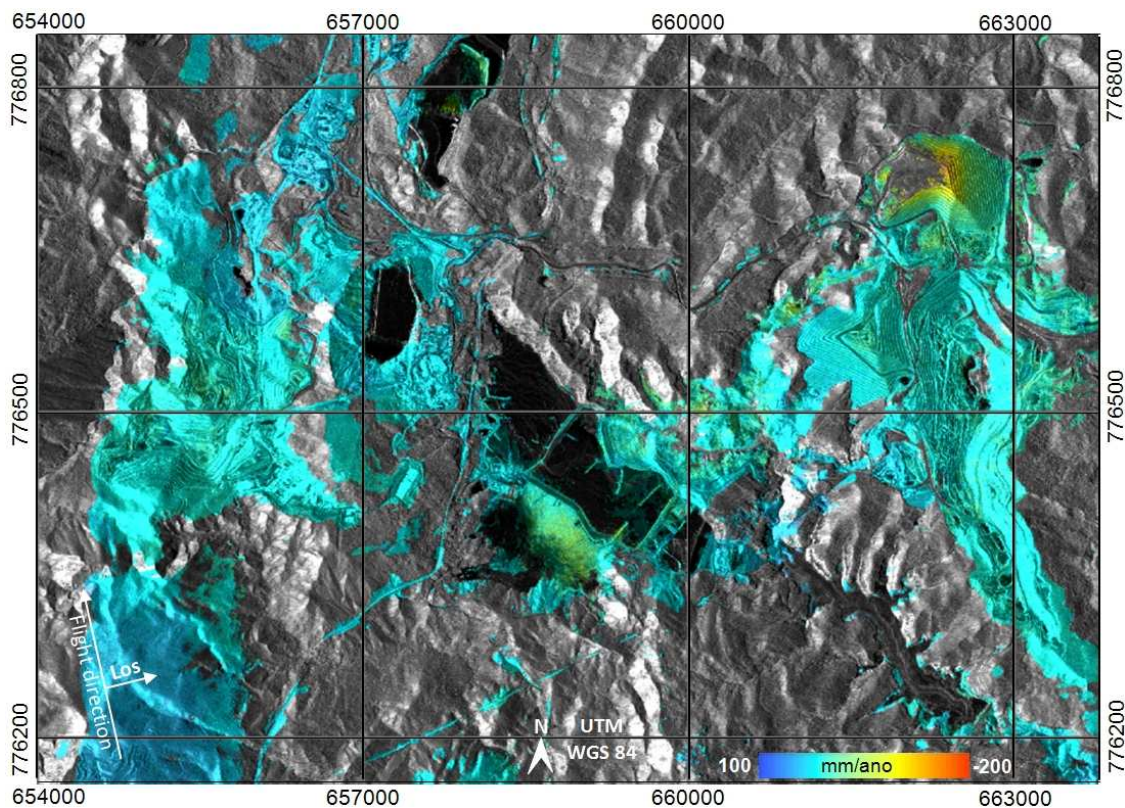


Figura 7. Mapa de velocidade de deslocamento de superfície na direção da linha de visada do satélite (LoS), baseado na abordagem DTS, no período de 11/11/2015 a 14/04/2016, com imagem de fundo do satélite TerraSAR-X.

Alguns setores no mapa da Figura 7 apresentam deslocamentos de elevação (positivos) e subsidência (negativos) na linha de visada do radar (LoS), principalmente em pilhas de material estéril e na área da barragem de Germano. Setores com coloração azul escuro na Figura 7 (principalmente no lado direito da imagem) mostram indícios de elevação (*up lift*), provavelmente devido a erros no processo de desdobramento da fase interferométrica, bem como em possíveis erros na remoção da componente de fase relativo à atmosfera. As possíveis causas destes problemas já foram abordadas no item 5.1.

As Figuras 8 apresentam deslocamento superficiais na linha de visada do satélite (LoS) em pilhas de estéril, como apresentados nos gráficos destas figuras, que podem estar associados a recalques ao longo do tempo, como mostrado em Victorino et al. (2016). Uma validação com medidas topográficas pontuais de campo seria oportuna.

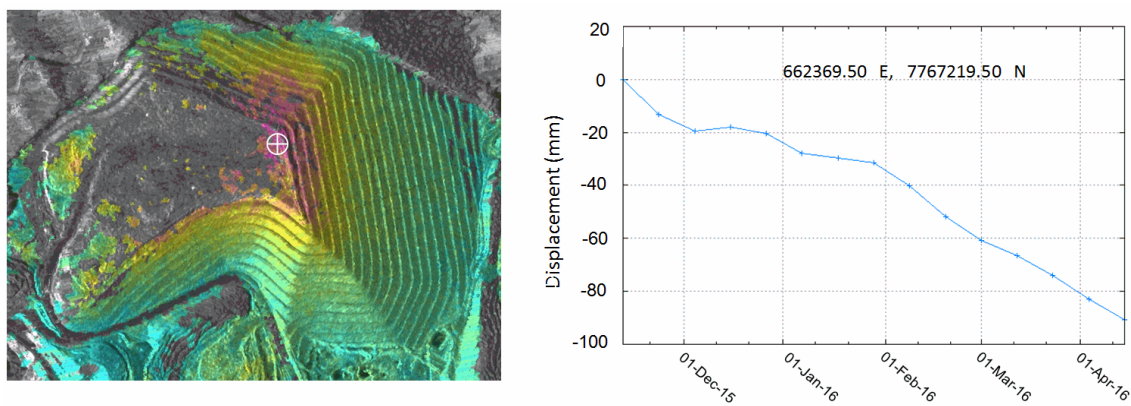


Figura 8. Pilha de estéril mostrando deslocamento superficial acumulado (provável recalque) de aproximadamente -96 mm no período imageado de 11/11/2015 a 14/04/2016.

A Figura 9 mostra o deslocamento superficial na linha de visada do satélite (LoS) na área da barragem de Germano, alcançando o valor acumulado de aproximadamente -45 mm no ponto analisado, cujas causas devem ser investigadas e que podem ser indicativas de movimentação ligadas a presença de descontinuidades (trincas).

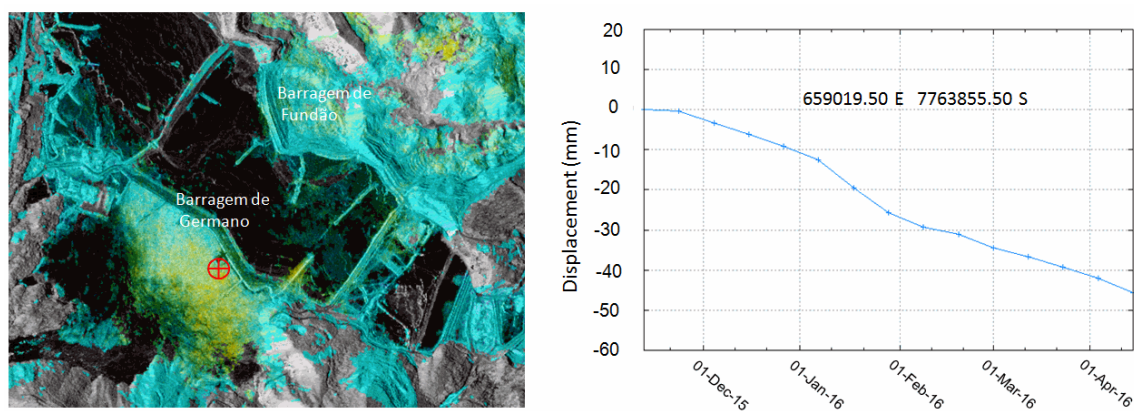


Figura 9. Setor da barragem de Germano apresentando deslocamento superficial em LoS (subsidência) de aproximadamente -45 mm no período imageado de 11/11/2015 a 14/04/2016.

6. Conclusões

Este trabalho apresenta os resultados de uma primeira análise do uso da técnica de Interferometria Diferencial SAR pela equipe do INPE/VISIONA, na área de estudo do complexo mineral de Germano, no município de Mariana/MG onde ocorreu o rompimento

da barragem de Fundão em cinco de novembro de 2015, visando conhecer o potencial desta técnica neste ambiente, fazendo uso de um conjunto de 15 imagens do satélite TerraSAR-X operado pela empresa AIRBUS DEFENCE & SPACE.

Devido ao fato da área de estudo ser muito heterogênea em termos da cobertura vegetal diversificada, intensa atividade antropogênica e relevos colinosos a montanhosos, isto causa uma perda de correlação entre as imagens SAR, tornando o uso da técnica de Interferometria Diferencial SAR em uma tarefa bastante desafiadora, principalmente com um conjunto de apenas 15 imagens. Mesmo assim, os mapas de deslocamento de superfície apresentados nas Figuras 5 e 7, mostram informações significativas.

Os processos de recalques encontrados em pilhas de estéril na área de estudo devem ser investigados e correlacionados com dados de campo. Nas pilhas de estéril da área analisada deslocamento acumulado em LoS foi de até -92 mm no período de 11/11/2015 a 14/04/2016 (Figura 8). A Figura 9 mostra uma área de deslocamento de superfície (em cor amarelo) na barragem de Germano, alcançando valor acumulado em LoS de -45 mm, cujas causas devem ser investigadas e que podem ser indicativas de movimentação ligadas a presença de descontinuidades (trincas). O não acesso aos dados de campo destes locais não permitiu uma validação.

Este estudo mostrou alguns problemas relacionados ao o processo na etapa de desdobramento da fase interferométrica de alguns interferogramas, principalmente devido às características da área, ou seja, de ser muito fragmentada e de baixa coerência interferométrica, bem como pelo fato de ter sido utilizada um número relativamente pequeno de imagens SAR, apenas 15, o que contribui para que o processo de remoção das componentes de fase relacionada à atmosfera não seja muito eficaz. Estes problemas ocorreram tanto na utilização da metodologia SBAS como na DTS.

Mais processamentos serão realizados visando a melhorias dos resultados. Uma possibilidade provável de obtermos melhores resultados seria a utilização de uma sequência temporal maior de imagens do satélite TerraSAR-X, ou seja, a partir 20 ou mais imagens. Com um número maior de imagens a técnica PSI (Persistent Scatterer Interferometry) poderia ser utilizada, provendo informações em plena resolução das imagens SAR, além de apresentar melhor desempenho em área com comportamento não linear de deslocamento superficial, como mostrado em Mura et al. (2016).

Deve ser salientado que as duas abordagens DInSAR-TS (SBAS e DTS) forneceram resultados gerais bem compatíveis. Apesar de não ser uma "*real time technique*", a técnica DInSAR-TS é valiosa para fins de planejamento e monitoramento de grandes áreas (sinóptica), provendo medidas de estabilidade de elevada resolução (mm) e sem necessidade de campanhas e de instalação de equipamento sem campo. A integração desta técnica com dados geotécnicos de campo convencionais (estação total/prismas, radar de solo, etc...) fornece uma solução de monitoramento mais abrangente, como mostrado em Paradella et al. (2015).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das empresas VISIONA e AIRBUS DEFENCE & SPACE ao projeto de pesquisa no fornecimento das imagens TerraSAR-X e PLEIADES 1A para o desenvolvimento dos estudos.

Referências Bibliográficas

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," **IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing.**, vol. 40, no. 11, November, 2375-2383 (2002).

Constantini, M., "A Novel Phase-Unwrapping Algorithm based on Network Programming", **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, vol. 36, no. 3, May, 813-820 (1998).



- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., "Permanent scatterers in SAR interferometry" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1), 8-20 (2001).
- Goldstein, R.M., Werner, C.L., "Radar interferogram filtering for geophysical applications " **Geophysical Research Letters** 25 (21), 4035-4038 (1998).
- Gama, Fabio F.; Cantone, Alessio; Santos Athos R. ; Pasquali, Paolo ; Paradella, Waldir R. ; Mura, Jose C. ; Silva, Guilherme G. . Monitoring subsidence of waste piles and infrastructures of active open PIT iron mine in the Brazilian Amazon Region using SBAS interferometric technique and TerraSAR-X data", **IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, 2015, Milan. 2015, p. 282-285.
- Golub, G., Loan, C., [Matrix Computations], **John Hopkins University Press**, Baltimore, 427-435 (1989).
- Jiang, L., Lin, H., Ma, J., Yao, B. K., Wang, Y., "Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda (Northern China) case study", **Remote Sensing of Environment**, 115, 257-268 (2011).
- IBAMA, "Laudo Técnico Preliminar - Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Novembro de 2015", www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias.../laudo_tecnico_preliminar.pdf
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms", **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, 42 (7), 1377-1386 (2004).
- Lee, C., Lu, Z., Kwoun, O., Won, H., "Deformation of the Augustine Volcano, Alaska, 1992–2005, measured by ERS and ENVISAT SAR interferometry. **Earth Planets Space**, 60, 447-452 (2008).
- Lundgren, P., Usai, S., Sansosti, E., Lanari, R., Tesauro, M., Fornaro, G., Berardino, P., "Modeling surface deformation observed with SAR interferometry at Campi Flegrei caldera," **Journal of Geophysics Research.**, vol. 106, September, 19355-19367 (2001).
- Mura J. C., Paradella W. R., Gama F. F., Santos A. R., Monitoring of Surface Deformation in Open Pit Mine Using DInSAR Time-Series: A Case Study in the NSW Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. **Proceedings of SPIE Remote Sensing 2014 Conferences**, Vol. 9243 924311-1 (2014).
- Mura, J. C., Paradella, W. R.; Gama, F. F., Silva, G. G., Galo, M., Camargo, P., Silva, A., Silva, A., Monitoring of Non Linear Ground Movement in an Open Pit Iron Mine Based on an Integration of Advanced DInSAR Techniques Using TerraSAR-X Data, **Remote Sensing**, 8, 409 (2016).
- Paradella, W. R., Ferretti, A., Mura, J. C., Colombo, D., Gama, F. F., Tamburini, A., Santos, R. A., Novalli, F., Galo, M., Camargo, P. O., Silva, A. Q., Silva, G. G., Silva, A., Gomes, L. L., "Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis", **Engineering Geology**, 193, 61-78 (2015).
- Samsonov, S., D'Oreye, N., "Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province", **Geophysical Journal International**, 191, 1095-1108 (2012).
- Schmidt, D. A. Bürgmann, R., "Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California from a large InSAR data set," **J. Geophysical Research.**, vol. 108, no. B9, September, 2416-2429 (2003).
- Usai, S., "A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry," in *Proc. IGARSS 2002*, vol. 2, Toronto, ON, Canada, June, 1247-1250 (2002).
- Victorino, H. ; Paradella, Waldir R. ; Gama, F. F. ; Mura, J. C. . Análise de Deformação de Pilhas de disposição de estéril no Complexo Minerador de Carajás com o uso de dados Stripmap do Satélite TerraSAR-. RBC. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, p. 1-10, 2016.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A., "Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping" **Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003)**, Toulouse (France), vol. 7, 4362-4364 (2003).
- Werner, L. C., Wegmuller, U., Strozzi, T., "Deformation Time-series of the Lost-Hills Oil Field using a Multi-Baseline Interferometric SAR Inversion Algorithm with Finite Difference Smoothing Constrains", **AGU Fall Meeting**, December, (2012).