

DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS NA SUPERFÍCIE DA BARRAGEM DE GERMANO, EM MARIANA-MG, COM SÉRIE TEMPORAL DE INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR

P. Negrão¹, J. C. Mura¹, F. F. Gama¹, W. R. Paradella¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

Comissão IV – Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Interpretação de Imagens

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a detecção de deslocamentos superficiais na linha de visada do radar nas estruturas da barragem de Germano, através da técnica de Série Temporal de Interferometria Diferencial SAR (DTS). Para tal, utilizou-se uma série de 30 imagens adquiridas com o satélite TerraSAR-X, no período de 11 de novembro de 2015 a 18 de outubro de 2016, com intervalo de 11 dias. Com a técnica, foi possível detectar deslocamentos da ordem de centímetros. Os maiores deslocamentos detectados estão localizados na sub-estrutura denominada Baía 3 e seu reservatório, que contém rejeitos finos do processo de beneficiamento de minério de ferro. Para esses deslocamentos detectados, apesar de serem esperados devido às atividades de mineração na região e ao processo de acomodação do material de rejeito, recomenda-se uma investigação de outras possíveis causas.

Palavras chave: DInSAR *Time Series*, Barragem de Germano, Mariana-MG, TerraSAR-X

ABSTRACT

The purpose of this work is to detect surface displacements in the radar line of sight in the structures of the Germano Dam, through the technique of Differential SAR Interferometry Time Series (DTS). For this purpose, a series of 30 images acquired with TerraSAR-X satellite was used, from November 11, 2015 to October 18, 2016, with an interval of 11 days. With the technique, it was possible to detect displacements of the order of centimeters. The largest displacements detected are located in the sub-structure named *Baia 3* and its reservoir, which contains fine tailings from the iron ore beneficiation process. For these detected displacements, although expected due to the mining activities in the region and processes of waste material accommodation, it is recommended to investigate other possible causes.

Keywords: DInSAR Time Series, Germano Dam, Mariana-MG, TerraSAR-X

1- INTRODUÇÃO

Atividades de mineração a céu aberto podem causar instabilidades em extensas áreas, incluindo porções do terreno adjacentes à cava da mina. Devido à ocorrência dessas instabilidades, é fundamental o monitoramento de estruturas como taludes, pilhas e barragens de rejeito ou material estéril, entre outras (Mura et al., 2015).

No complexo minerário de Germano, em Mariana-MG, foram construídas diversas barragens para contenção de rejeitos do processo de extração de minério de ferro dessa região. Em 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, nesse complexo, caracterizando o maior desastre socioambiental da história do país e o maior do mundo

envolvendo barragens de rejeitos. Esse acidente reforça a importância de se obter informações sobre as deformações em superfície em extensas áreas de mineração, para análise de risco, alarme e planejamento.

A Interferometria Diferencial (*Differential SAR Interferometry* - DInSAR) com dados de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR) é uma técnica que permite a detecção de deslocamentos da ordem de centímetros e até milímetros em uma extensa área, o que permite uma visualização sinóptica de deslocamento superficial em toda a área da mineração.

A técnica DInSAR visa a detecção de deslocamentos ocorridos entre as aquisições das

imagens a partir da diferença de fase do sinal de *pixels* homólogos. Para isso, as imagens devem ser, necessariamente, adquiridas em instantes distintos.

Com a utilização de uma série temporal de imagens SAR, a amostragem do fenômeno de deformação é maior e assim é possível aplicá-la a trabalhos de monitoramento de movimentações.

Uma das abordagens de séries temporais de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR *Time Series* – DTS), implementada no software Gamma da empresa Gamma Remote Sensing and Consulting AG, é uma variante da abordagem SBAS (*Small Baseline Subset*), conceito de linha de base curta introduzido por Berardino et al. 2002, a qual permite a utilização de um fator de suavização para evitar variações bruscas na velocidade de deformação, assumindo que menos deformações possam ocorrer durante períodos curtos de tempo. Essa abordagem tem sido aplicada com sucesso, como mostra os trabalhos de Schmidt e Burgmann (2003), Mura et al. (2015), Gama et al. (2015), entre outros.

Tendo em vista o potencial da técnica DTS para o monitoramento de instabilidades em mineração, o objetivo do trabalho foi aplicá-la à detecção de deslocamentos superficiais no entorno da barragem de Germano, com a utilização de uma série temporal de 30 imagens TerraSAR-X, compreendendo o período de 11 de novembro de 2015 a 18 de outubro de 2016.

2- ÁREA DE ESTUDO

A área analisada neste estudo é a Barragem de Germano, como mostrada na Figura 1, que é adjacente à, agora rompida, Barragem do Fundão. Essas barragens pertencem ao complexo minerário de Germano, localizado no município de Mariana-MG.

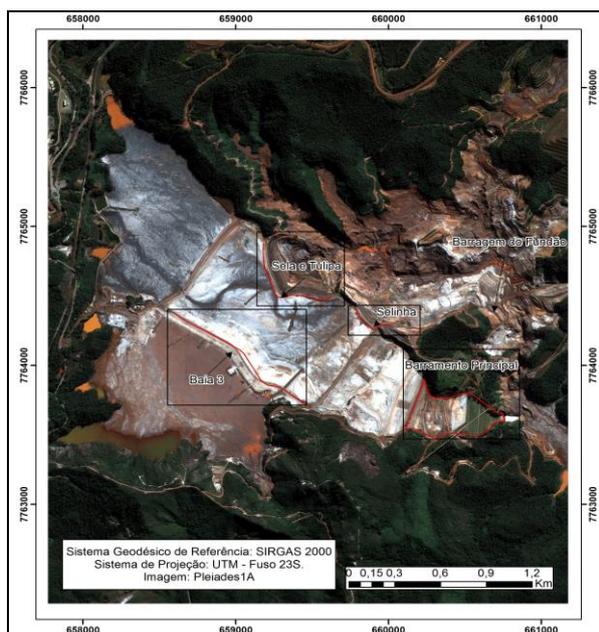


Fig. 1 – Área de estudo.

Como mostra a Figura 1, a Barragem de Germano está setorizada em 4 estruturas: Baía 3, Sela e Tulipa, Selinha e Barramento Principal.

A Baía 3 tem a função de receber os rejeitos finos (lamas), enquanto os diques de Selinha, Sela e Tulipa e o Barramento Principal são estruturas construídas em rejeito compactado (Pinto et al., 2017).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Uma imagem interferométrica, 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* (Mura, 2000).

A fase do sinal apresenta diversas contribuições, algumas delas aleatórias. As principais contribuições à fase interferométrica, são: diferenças nas trajetórias orbitais entre as duas aquisições, topografia do terreno, deslocamentos ou movimentações na linha de visada do satélite (*line of sight* – LoS), atraso atmosférico do sinal e erros sistemáticos e aleatórios causados pelo sistema imageador e pelas mudanças nas características dos alvos (Massonet e Feigl, 1998).

Como mencionado na seção 1, a DInSAR visa a detecção de deslocamentos superficiais ocorridos entre duas aquisições de imagens SAR, devendo essas aquisições acontecerem em instantes distintos. Sendo assim, é necessário isolar a componente do deslocamento das demais componentes da fase interferométrica. A componente topográfica pode ser simulada a partir de um modelo digital de elevação (MDE) disponível. Neste trabalho foi utilizado um MDE de 2m de resolução, gerado a partir de três imagens coletadas pelo sensor do satélite Pleiades1A em estereoscopia.

Subtraindo a fase topográfica simulada a partir do MDE, a fase interferométrica ($\phi_{\Delta t}$) restante é função da fase devido ao deslocamento entre as aquisições, além das outras componentes, como apresentado na Equação 1.

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

Na Equação 1, ϕ_{dr} representa 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, responsável por atrasos no sinal, ϕ_{β} é a componente de fase devido a erros de órbita e ϕ_{η} representa o ruído de fase.

A técnica DTS baseia-se na análise de uma pilha de interferogramas diferenciais multi

referenciados e processados em *multi-look* (filtro de média espacial), construídos com uma série temporal de imagens SAR de uma mesma cena.

Neste trabalho foi utilizada uma série temporal de 30 imagens do sensor do satélite TerraSAR-X, de comprimento de onda de 3,1cm, polarização HH, modo *StripMap*, espaçamento do *pixel* em azimute de 1,90m e em *range* de 0,91m, no formato SLC (*Single Look Complex*) adquiridas entre 11 de novembro de 2015 e 18 de outubro de 2016, a cada 11 dias, em órbita ascendente e com ângulo de incidência médio de 35°, com faixa de imageamento de 30 por 60Km. As imagens passaram pelo processamento *multi-look*, para minimização da componente do ruído de fase, com janela de 2x2, o que resultou em *pixels* de 3,8m em azimute e 1,8m em *range*.

Como a DTS utiliza a configuração de linhas de base curtas, um conjunto de 77 interferogramas foi selecionado segundo valores máximos de 35 dias e 900m para as linhas de base temporal e espacial, respectivamente. Esses interferogramas passaram por uma filtragem espectral adaptativa com janela de 128x32 *pixels* para gerar as imagens de coerência interferométrica, que é uma medida da variabilidade da diferença de fase.

Foram selecionados então *pixels* segundo o critério de coerência. Esse critério apresenta valores entre 0 e 1, sendo 0 para pouca coerência e alta variabilidade e 1 para alta coerência e baixa variabilidade. Como nessa técnica são utilizadas imagens adquiridas em datas distintas pode haver perda de coerência devido a mudanças nas características dos alvos. O valor de coerência mínima utilizado neste trabalho foi de 0,4.

Selecionados os interferogramas e os *pixels* para a análise, é necessário então selecionar um ponto de referência, o qual deve estar localizado em uma região estável (sem deslocamento ao longo da série temporal). Uma vez que a fase é cíclica, isto é, varia de 0 a 2π , é necessário realizar o processo de desdobramento de fase (*phase unwrapping*) para então estimar a grandeza desejada. Para tal, foi utilizado o algoritmo MCF (*Minimum Cost Flow*) proposto por Constantini (1998).

Considerando então esse ponto de referência estável e um ponto genérico de coordenadas em azimute e *slant range* (x e r , respectivamente), os valores de fase interferométrica (ϕ_{Δ}) desse ponto genérico em relação ao ponto de referência podem ser organizados em um vetor de 77 elementos, como representado na Equação 2.

$$\phi_{ObML(x,r)}^T = [\phi_{\Delta 1(x,r)} + \phi_{\Delta 2(x,r)}, \dots, \phi_{\Delta 77(x,r)}] \quad (2)$$

Considerando t_0 como a referência temporal (deformação zero na data da primeira imagem), os 29 valores de fase desconhecidos, referente às demais datas de aquisição, relacionados ao deslocamento em LoS do ponto genérico (x,r) na ordem temporal (t_1, t_2, \dots, t_{29}) podem ser escritos como o vetor deslocamento representado pela Equação 3.

$$\phi_{Disp(x,r)}^T = [\phi_{dr1(x,r)}(t_1), \phi_{dr2(x,r)}(t_2), \dots, \phi_{dr29(x,r)}(t_{29})] \quad (3)$$

A Equação 4 apresenta na forma matricial o relacionamento entre o deslocamento em LoS (Equação 3) e os dados observados (Equação 2), que se trata de um sistema de 77 equações e 29 variáveis desconhecidas.

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

Na Equação 4, A é uma matriz de dimensão 29x77 de operadores de adição, subtração e ausência (1, -1, 0) que definem as operações entre os pares interferométricos. A solução do sistema da Equação 4, para a determinação das medidas de deslocamento, pode ser obtida utilizando-se a abordagem dos mínimos-quadrados, aplicado à Equação 5 (Usai, 2002).

$$\phi_{Disp(x,r)} = (A^T A)^{-1} A^T \phi_{ObML(x,r)} \quad (5)$$

O sistema da Equação 5 torna-se mal condicionado quando há um número grande de pares interferométricos, podendo apresentar várias soluções. Para solucionar esse problema, o sistema de equações pode ser invertido com a aplicação do método SVD (*Single Value Decomposition*) (Golub, 1989). O resultado é o valor de deformação na linha de visada do radar (LoS) ocorrida entre as datas subsequentes. De maneira a suavizar variações bruscas, que não condizem com a deformação real, foi aplicado um fator de suavização (γ) de 10,6.

O processamento interferométrico foi efetuado com o software Gamma Remote Sensing.

Com essa solução foi possível ver o comportamento da deformação para os *pixels* analisados ao longo da série temporal.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta o mapa de velocidade de deslocamento na linha de visada do radar (LoS). Os deslocamentos negativos representam deformações de subsidência, enquanto os deslocamentos positivos representam soerguimento, em LoS.

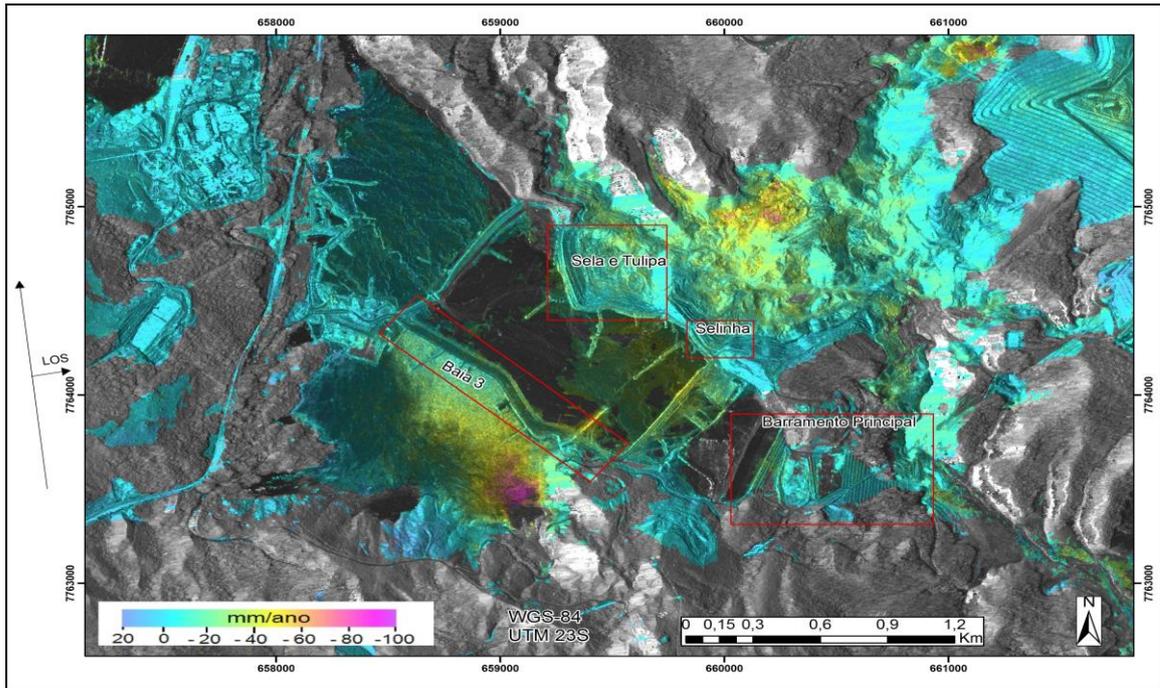


Fig. 2 – Mapa de velocidade de deslocamento.

A imagem de fundo na Figura 2 é uma imagem TerraSAR-X, processada em *multi-look* para minimização do efeito *Speckle* (efeito granuloso inerente a imagens de radar). Os *pixels* da imagem que não apresentam a cor da escala de mm/ano são os *pixels* que não apresentaram coerência interferométrica superior a 0,4 e por isso não foram analisados com a técnica. Como a área de estudo apresenta relevo montanhoso e cobertura vegetal densa, pertencendo a região ao bioma mata atlântica, muitos *pixels* não entraram na análise.

Na sub-estrutura Baía 3 foram detectados deslocamentos de até 8cm (total desde a primeira data de aquisição até a última), e em seu reservatório foram detectados deslocamentos de até 10cm. Nos diques de Sela e Tulipa e Selinha foram detectados deslocamentos acumulados de até 3cm e 2cm,

respectivamente. No Barramento Principal detectou-se deslocamentos acumulados de até 4cm. A Figura 3 apresenta o gráfico com o valor do deslocamento (em metros) para cada data de aquisição de dados, para um ponto localizado na Baía 3.

Os maiores deslocamentos detectados foram na Baía 3 e seu reservatório, que acomoda rejeitos finos, como mencionado na Seção 2. Sendo assim, essa subsidência é coerente com o processo, uma vez que há acomodação desses rejeitos. No trabalho dos autores Pinto et al. (2017) também foi detectada a predominância de deformação nessa sub-estrutura. Nas outras sub-estruturas (Sela e Tulipa, Selinha e Barramento Principal), que se destinam a contenção de material compactado, as deformações foram menores, indicando estabilidade destas estruturas.

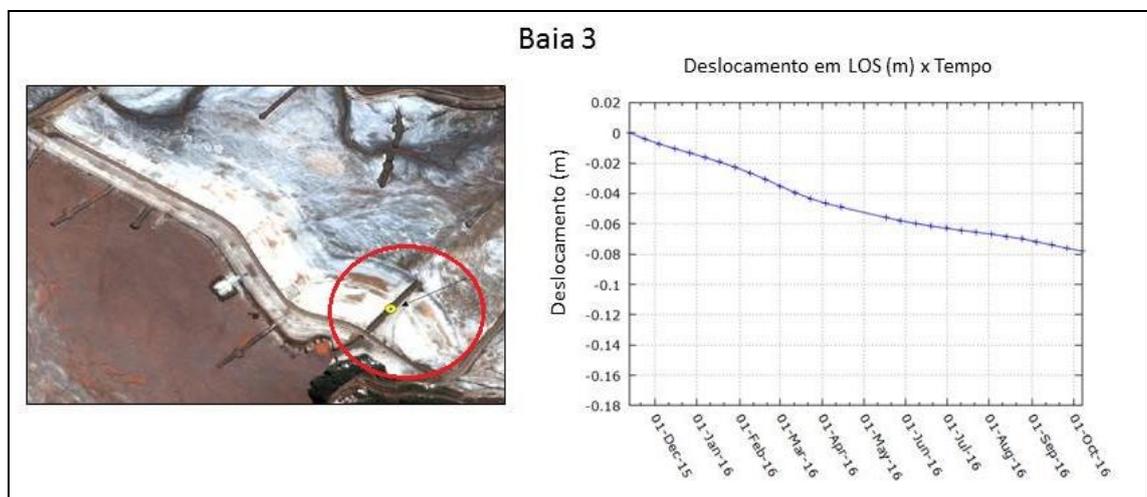


Fig. 3 – Deslocamento acumulado na Baía 3.

5- CONCLUSÕES

O resultado deste trabalho mostrou que o uso de séries temporais de Interferometria Diferencial SAR é muito eficaz para monitoramento de estruturas em ambientes de mineração, uma vez que permitiu a detecção de deslocamentos superficiais da ordem de centímetros em uma extensa área sem a necessidade de visitas a campo. Os resultados obtidos com a técnica permitem derivar informações para planejamento preditivo e avaliação de riscos no monitoramento da barragem.

Embora tenha havido diminuição da coerência interferométrica devido às características da cobertura vegetal e do relevo montanhoso da região, foi ainda possível obter informações suficientes para determinação de deslocamentos nas estruturas de interesse.

Ainda que os valores de deformação encontrados na Baía 3 sejam coerentes com o processo de acomodação de material de rejeito, recomenda-se que suas causas sejam investigadas, pois elas podem também estar associadas à presença de descontinuidades, ou a outros fatores de risco.

Essa região continua sendo investigada, pelos mesmos autores deste trabalho, com uma técnica ainda mais robusta de Interferometria Diferencial: Espalhadores Persistentes em Interferometria (*Persistent Scatterer Interferometry* – PSI) e com um conjunto maior de imagens do satélite TerraSAR-X.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas VISIONA Tecnologia Espacial S.A e AIRBUS DEFENCE & SPACE pelo fornecimento de imagens TerraSAR-X e Pleiades 1A, e de MDE para realização dos trabalhos.

Agradecimento também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio para aquisição de softwares para o processamento dos dados, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berardino, P.; G. Fornaro; R. Lanari e E. Sansosti, 2002. A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential sar interferograms. IEEE international geoscience and remote sensing symposium, Vol. 2, Nº. 11, pp. 2375–2383.

Constantini, M. A., 1998. Novel Phase-Unwrapping Algorithm based on Network Programming. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, Nº. 3, pp.813-820.

Gama, F. F.; A. Cantone.; A. R. Santos; P. Pasquali; W. R. Paradella; J. C. Mura e G. G. Silva, 2015. 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. In IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milão, Itália, pp. 282-285.

Golub, G. e C. LOAN, 1989. Matrix Computations, John Hopkins University Press, Baltimore, pp. 427-435.

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, 1998.

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.; W. R. Paradella; F. F. Gama; , A. R. Santos e G. G. Silva, 2015. Monitoramento de deformações de superfície em mina de ferro a céu aberto (N5W Carajás) utilizando série temporal de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR), baseado em dados do satélite TerraSAR-X, In Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), João Pessoa-PB, Brasil, pp. 0911-0918.

Pinto, C. A.; C. Sánchez; S. R. C. Carneiro e B. M. Castilho, 2017. O uso da tecnologia insar (interferometria de radar de abertura sintética) para o monitoramento da estabilidade de barragens, In XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte-MG, Brasil, pp. 3-15.

Schmidt, D. A. e R. Bürgmann, 2003. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California from a large InSAR data set. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, Nº. B9, pp. 2416-2429

Usai, S. A., 2002. Least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential sar interferometry. IEEE international geoscience and remote sensing symposium, pp. 1247–1250.