

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

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

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

Abstract. This work presents an investigation of surface deformation using Differential SAR Interferometry (DInSAR) time-series carried out in an active open pit iron mine, the N5W, located in the Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon region), using 33 TerraSAR-X (TSX-1) scenes. This mine has presented surface of deformation and monitoring measurements over sectors of the mine (pit walls) have been done based on ground based radar. In order to decrease the topographic phase error a high resolution DEM was generated based on a stereo GeoEye-1 pair. The time-series analysis was performed using the 31 interferometric pairs, which were selected based on the highest mean coherence of a stack of 107 interferograms, presenting less phase unwrapping errors. The time-series deformation was retrieved by the Least-Squares (LS) solution using an extension of the Singular Value Decomposition (SVD), with a set of additional weighted constrain on the acceleration deformation. 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. The DInSAR time-series investigation showed good results for monitoring surface displacement in the N5W mine located in a tropical rainforest environment, providing very useful information about the ground movement for alarm, planning and risk assessment.

Palavras-chave: DInSAR série-temporal, mina a céu aberto, deformação de superfície, TerraSAR-X, Carajás

1. Introdução

Operações em minas a céu aberto ocupam áreas extensas incluindo porções de terreno adjacentes à cava da mina. 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 de mineração a céu aberto. Este cenário nas minas de ferro de Carajás piora ao longo do tempo, devido a intensas escavações profundas em solos e rochas do tipo saprolítico de baixa qualidade geomecânica, juntamente com as práticas de detonação e precipitação intensa dos trópicos úmidos, com efeitos prejudiciais na estabilidade global das minas.

O uso da técnica de Interferometria Diferencial SAR simples (DInSAR), que utiliza apenas um par de imagens SAR para monitoramento de deformações de superfície tem sido utilizada desde o início da década de 90 para alerta de curto prazo. As aquisições multi temporais possibilitaram a melhoria da capacidade de detecção da variação temporal dos fenômenos de deformação, utilizando série-temporal de pares DInSAR, tais como os propostos por Lundgren et al. (2001), Usai (2002), Schmidt e Burgmann (2003), Mora et al. (2003), Crosetto et al. (2005). Esta técnica utilizando o conceito de linha de base curta (SBAS), introduzida por Berardino et al. (2002), tem sido aplicada com sucesso por vários autores, Lanari et al. (2004), Lee et al. (2008), Jiang et al. (2011), Samsonov et al. (2012), entre outros.

Este estudo apresenta uma aplicação da técnica DInSAR para monitorar deformações de superfície na mina de ferro a céu aberto N5W, localizada na Província Mineral de Carajás (Amazônia brasileira). Na próxima seção é apresentada a descrição particular da mina, bem

como algumas informações sobre deformações superficiais detectadas. A técnica de DInSAR simples e de séries temporais são apresentadas na seção 3. Os resultados obtidos a partir das medições utilizando a abordagem de série temporal DInSAR e medidas de campo utilizando radar de superfície são apresentados na seção 4. Na seção 5 são apresentados os resultados obtidos e as conclusões, bem como a avaliação do potencial desta técnica para monitoramento operacional, visando o planejamento de lavras e avaliações de risco.

2. Área de estudo

A Província Mineral de Carajás, localizada na fronteira oriental da Amazônia, é a mais importante do Brasil e engloba os maiores depósitos de ferro do mundo. A província, com uma área de 120.000 Km², é marcada por terrenos montanhosos, caracterizada por um conjunto de colinas e planaltos (altitudes 500 a 900 m), cercada por planícies ao sul e ao norte (altitudes em torno de 200 m), com intemperismo químico profundo, que produziu espessa camada de latossolos, totalmente cobertos por comunidades de floresta Ombrófila Equatorial de numerosas espécies. Pertencente à empresa de mineração Vale SA, a exploração em Carajás é realizada utilizando o estado da arte em bancadas de minas a céu aberto. As atividades de mineração atuais estão relacionados com dois corpos de minério de ferro (N4 e N5), que foram iniciadas em 1984 com a mina N4E e em 1998 com a mina N5W.

Deformações superficiais foram detectadas por inspeção visual realizada pela equipe de geotécnica da Vale na mina N5W (Figura 1), através da presença de fraturas nas paredes das bancadas, trincas em bermas e rampas de acesso. Além disso, um programa de monitoramento de campo baseada no uso de radar de superfície (Figura 2a) e estação total/prismas (Figura 2b), fornecem informações quantitativas sobre o deslocamento da superfície desde 20 de março de 2012, Vale S. A. (2012). As deformações permaneceram sem evolução significativa até 12 de Agosto de 2012, quando houve então uma reativação com deslocamento relevante nas faces e bermas dos taludes, sem contudo caracterizar instabilidade na mina.

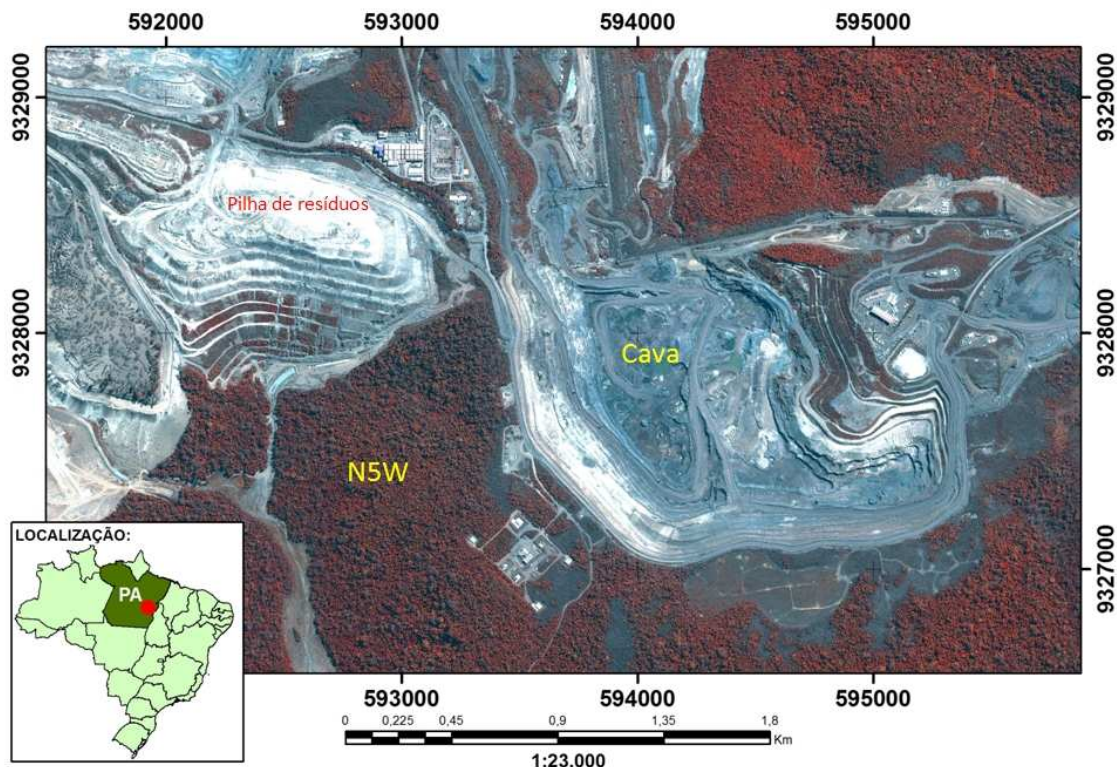


Figura 1 - Área de estudo (N5W mina de minério de ferro - Carajás-PA)

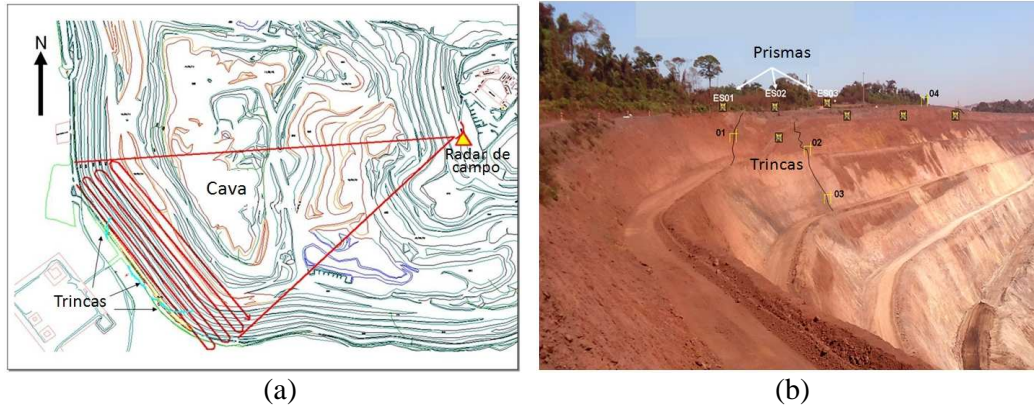


Figura 2 – Ilustração do monitoramento das bancadas da mina N5W com radar de campo (a), bancadas de N5W mostrando algumas trincas e prismas reflexivos (b) (fonte: Vale SA)

3. Metodologia

3.1 Técnica DInSAR

A técnica DInSAR simples tem como objetivo medir deformações no solo utilizando apenas um par de imagens SAR, adquiridas em diferentes épocas e posição do satélite. O interferograma gerado a partir destas duas imagens tem componentes de fase devido as 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 as contribuições do deslocamento do solo entre as aquisições, juntamente com outras componentes de fase indesejáveis, representada por:

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

onde ϕ_{def} é a fase devido ao deslocamento do pixel na linha de visada do satélite (*Line of Sight* - LOS), causada pela deformação no solo, ϕ_h é o erro da fase topográfico, ϕ_{atm} é o atraso de fase atmosférica, ϕ_{β} é a fase residual devido aos erros de orbita e ϕ_{η} é o ruído de fase.

A utilização da técnica DInSAR simples para monitorar deformações do terreno é adequada quando ϕ_{def} excede as outras quatro componentes de fase representadas na equação (1), por este motivo, a utilização de um DEM preciso é desejável para compensar parte do erro da fase topográfica. Devido a topografia complexa da superfície da mina (escavações profundas, pilhas resíduos elevadas, etc), foi gerado um modelo de elevação de alta resolução baseado em um par estéreo de imagens GeoEye-1, descrito em Paradella e Cheng (2013), a fim de diminuir o erro da fase topografia na análise DInSAR. Uma filtragem espacial reduz o ruído de fase, no entanto, o atraso da fase atmosférica e a fase residual devido a erros de órbita não podem ser filtrados ou estimados, respectivamente. Apesar destes inconvenientes, esta técnica tem sido ainda aplicada.

3.2 Série temporal DInSAR

Algoritmos para análise de séries temporais DInSAR foram desenvolvidos para melhor atender as limitações da técnica DInSAR simples, utilizando um número redundante de interferogramas diferenciais. Considerando um conjunto de M interferogramas diferenciais gerados a partir de 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), segundo as regras de menor intervalo de tempo entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base curtas (SBAS). Tomando um ponto como referência, localizado em uma área estável, e um ponto genérico selecionado, os

valores a fase (interferogramas) desdobradas observados neste ponto em relação ao ponto de referência, pode ser organizado em um vetor de M elementos, segundo a equação:

$$\phi_{Ob}^T = [\phi_{\Delta r1}, \phi_{\Delta r2}, \dots, \phi_{\Delta rM}] \quad (2)$$

Sendo N o número de valores de fase desconhecidos, relacionados com o intervalo de deslocamento do ponto selecionado na ordem temporal (t_0, t_1, \dots, t_N), e considerando t_0 como a referência temporal (deformação zero), o vector deslocamento pode ser representado por:

$$\phi_{disp}^T = [\phi_{\Delta r1}(t_1), \phi_{\Delta r2}(t_2), \dots, \phi_{\Delta rN}(t_N)] \quad (3)$$

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:

$$A \phi_{disp} = \phi_{Ob} \quad (4)$$

em que A é uma matriz de dimensão NxM 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:

$$\phi_{disp} = A^+ \phi_{Ob} \quad (5)$$

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

No caso de se utilizar um grande número de pares interferométricos diferenciais, para aumentar a amostragem temporal, o sistema de equações em (5) torna-se mal condicionado, por consequência, o sistema terá infinitas soluções. Para solucionar deste problema, o sistema em (5) pode ser invertido mediante a aplicação do método SVD (Singular Value Decomposition), Golub e Loan (1989). 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, que não faz sentido no estudo de deformações, uma solução mais eficaz foi obtida através da minimização da norma do vector velocidade de deslocamento proposto por Berardino et al. (2002).

Neste estudo, a solução da série temporal, mudando a equação (5) para velocidade de deslocamento, foi obtida utilizando uma extensão do método SVD, aplicando restrições na aceleração do deslocamento para controlar as variações bruscas no resultado da série temporal, Schimidt e Burgmann (2003), assumindo que menos deformação pode ocorrer durante períodos curtos de tempo, desta maneira, minimizando os efeitos de atraso de fase devido a atmosfera durante as aquisições das imagens. Os termos relacionados as restrições na aceleração (operadores com γ) e a erros do modelo de elevação (h_e) foram incorporados na inversão do sistema de equações, que relacionam os interferogramas desdobrados (ϕ_{Ob}) com a velocidade média de deslocamento (Vd), segundo Werner et al. (2012), dado por:

$$\begin{bmatrix} G & \phi_{\partial h} \\ \Gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ h_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{Ob} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde G representa a matriz NxM que define a configuração dos intervalos de tempo entre os pares interferométricos; $\phi_{\partial h}$ é um vector de M elementos que define a derivada de ϕ_{Ob} em relação à altura, para a estimativa de erro topográfico (h_e); Vd é o vector de N elementos que representa a velocidade média de deslocamento em cada intervalo de tempo e Γ é uma matriz (M-3)xN contendo os valores de restrição na aceleração do deslocamento, representados por:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma^2 & -2\gamma^2 & \gamma^2 & 0 & 0 \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma^2 & -2\gamma^2 & \gamma^2 & 0 \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots & \gamma^2 & -2\gamma^2 & \gamma^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde γ é o factor de suavização, variando entre nenhuma suavização ($\gamma = 0$) a uma solução que é essencialmente linear (grande valor de γ). Na presente análise utilizou-se $\gamma = 1,6$.

A aplicação de série temporal DInSAR neste estudo foi realizada utilizando-se o Gamma software, da empresa Gamma Remote Sensing and Consulting AG. Todos os interferogramas foram obtidos utilizando uma operação “multi-look”, resultando em um pixel de dimensão de 2,6 por 3,8 m em distância 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 0,3 foram desconsideradas. O processo de desdobramento da fase dos interferogramas foi realizado utilizando-se o algoritmo MCF (Minimum Cost Flow) proposto por Constantini (1998).

As aquisições das imagens SAR foram realizados entre 20 de março de 2012 a 20 de abril de 2013, com um planejamento de uma imagem a cada 11 dias, mas esta sequência falhou duas vezes, criando descontinuidades, de 22 e 44 dias. A fim de cobrir todo o intervalo de tempo de aquisição, construí-se pares interferométricos para intervalos de tempo de até 45 dias e linha de base máxima de até 800 m. Um total de 107 pares foram encontrados e para cada um foi calculada a sua coerência interferométrica média, o intervalo de tempo e a linha de base perpendicular. Verificou-se que valores maiores de coerência média ocorreram quando o intervalo de tempo foi de 11 dias, independentes dos valores de linha de base, com algumas exceções quando se teve apenas os intervalos de tempo de 22 e 44 dias

A seleção dos pares interferométricos diferenciais, para a análise da série temporal DInSAR, foi realizada com base no critério do maior coerência interferométrica média, de modo a reduzir os erros de desdobramento de fase. O configuração do conjunto de pares selecionados é mostrado na Figura 3, em cor vermelha, abrangendo o período de tempo do estudo. As conexões verdes pertencem aos pares interferométricos cujos valores de coerência média ficaram abaixo do limite estabelecido de 0.3. Na Figura 3 as barras cinza representam os intervalos de tempo de 22 e 44 dias ocorridos devido à falha de aquisições.

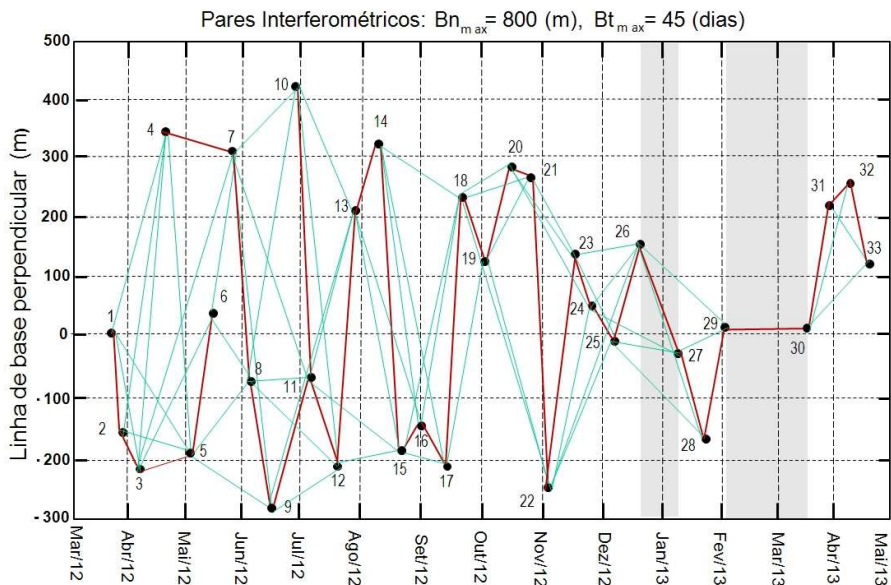


Figura 3. Pares interferométricos seleccionados (cor vermelha) e descartados (cor verde)

4. Resultados e discussões

Os resultados do processamento da série temporal DInSAR, utilizando a configuração de pares interferométricos mostrado na Figura 3, são apresentados na Figura 4 em termos da velocidade de deslocamento anual. As componentes de fases atmosféricas foram filtradas e removidas no domínio do espaço-tempo e os erros altimétrico foram estimados com base no

conjunto de linha de base normal. Um setor de grande deformação foi detetado na pilha de resíduos, com taxa de deformação é igual a -486,5 mm/ano, como mostrado no ponto A na Figura 4 e no gráfico da Figura 5a, o que é normalmente esperado para este tipo de pilha (indicativo de acomodação). Outro setor com deformação acentuada foi detetado nas bancadas e rampas no setor SW da mina N5W, com taxa de deformação igual a -255,7 mm/ano, conforme indicado no ponto B da Figura 4 e Figura 5b, associado com evidências de movimento na superfície (fraturas e trincas em paredes de bancadas, em bermas, rampas de acesso e estrada), em medições quantitativas in situ utilizando radar de campo. Dois fatores contribuíram para estas deformações: escavação profunda e baixa qualidade geomecânica do minério/rocha, e o controle estrutural dado pela zona de cisalhamento orientada segundo NW-SE e por sistema de falhas EW, como mapeados pela BVP (2011) sob contrato da Vale.

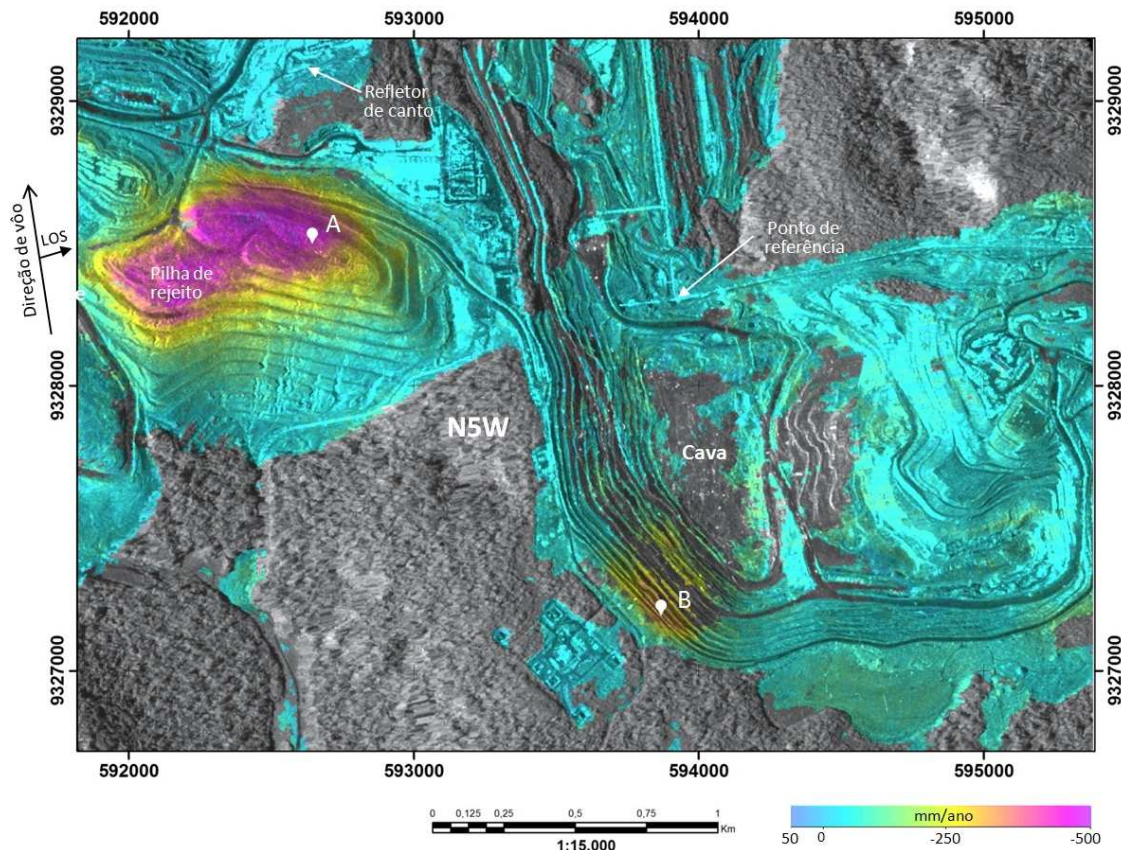


Figura 4 – Mapa de velocidade de deformação na direção de LOS obtido pela série temporal.

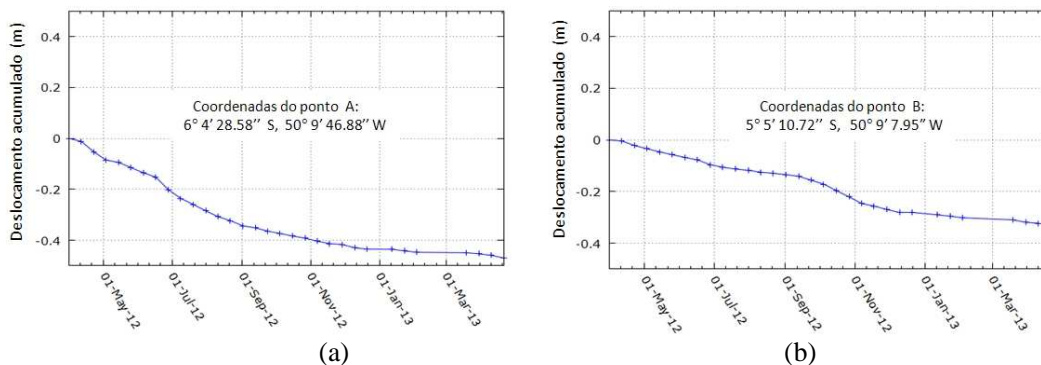


Figura 5 - Exemplo de deformação acumulada na pilha de resíduos (a) (ponto A da Figura 4) e em um ponto localizado nas bancadas da mina N5W (b) (ponto B da Figura 4).

Em uma tentativa de validar os resultados da série temporal DInSAR com dados de deslocamentos no campo, foram utilizadas medidas do radar de superfície, restrito ao monitoramento das bancadas da mina N5W. Apesar do período de monitoramento de campo ter sido de curta duração (17 a 24 de outubro de 2012), um pequeno e contínuo padrão de deformação pode ser visto na Figura 6 para 9 pontos monitorados na parede da cava da mina, com um valor de deformação máximo acumulado de 15 milímetros no período (projetados em LOS do radar de superfície).

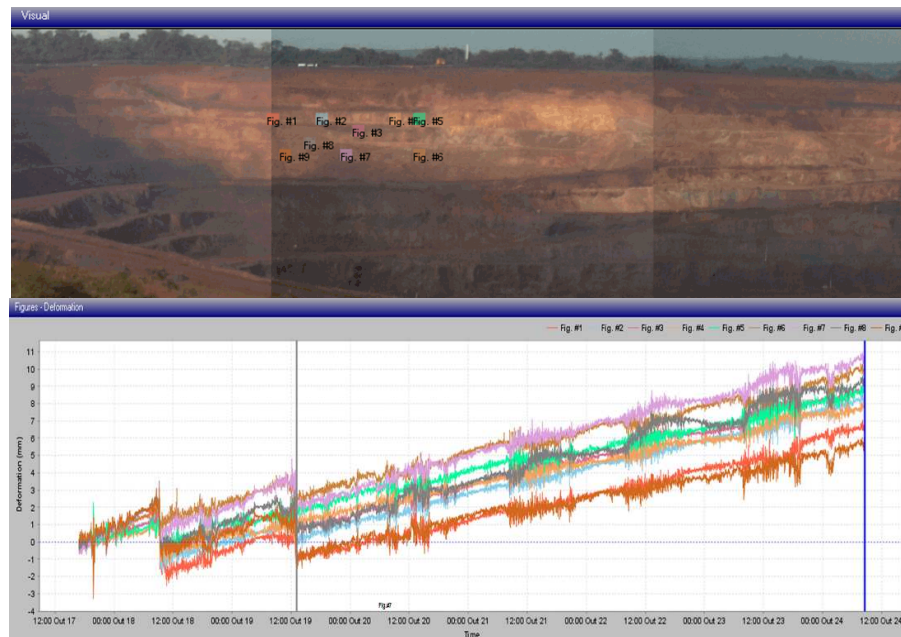


Figura 6 - Monitoring utilizando radar de campo em nove pontos da parede da cava de N5W, a parte superior da figura mostra as localizações dos pontos e a parte inferior da figura mostra os gráficos do deslocamento na geometria projetada em LOS do radar (fonte: Vale SA).

Considerando que as medições com o satélite TerraSAR-X e com o radar de superfície possuem linhas de visadas (LOS) diferentes, torna-se difícil comparar as duas informações de deslocamento, contudo, conclui-se que ocorreram deformações nas bancadas da mina com base nas evidências apresentadas pelas duas técnicas. Uma validação mais precisa seria compará-las com os dados medidos por estação total/prismas, que não estavam disponíveis nesta época.

5. Conclusões

A análise utilizando série temporal DInSAR utilizando 33 imagens do satélite TerraSAR-X, no período de março de 2012 a abril de 2013, forneceu informações sobre deformações do solo em dois setores principais da área da mina N5W, sobre a pilha de resíduos (com taxa de deformação de até -486,5 mm/ano) e sobre as bancadas da mina (com taxa de deformação de até -255,7 mm/ano). Para a pilha de resíduos a deformação detectada está relacionada a acomodação da superfície, mostrando valores normalmente esperados para este tipo de estrutura feita pelo homem, enquanto nas bancadas da mina, atributos litoestruturais e litomecânicos desempenharam um papel fundamental no desencadeamento de deslocamentos. Esta pesquisa demonstrou que a técnica DInSAR pode ser utilizada para monitorar deformações de superfície neste tipo de ambiente de mina a céu aberto, localizada em um ambiente de floresta tropical úmida (Amazônia), fornecendo informações úteis para planejamento e avaliação de riscos em mineração.

Agradecimentos

Esta investigação foi realizada no âmbito do projeto FAPESP-Vale-INPE (Processo FAPESP 2010/51267-9). O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) também é reconhecido por subsídio recebido pelo segundo autor durante o período da investigação. Os autores gostariam de agradecer a Vale S.A. pelo acesso aos dados de deformação de superfície *in situ*, mapas geológicos e geotécnicos e do radar de campo. Os autores são especialmente gratos à equipe de Geotecnia da Vale em Carajás, pelo o apoio durante as campanhas de trabalho de campo.

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).
- BVP, "Lithostructural and lithogeomechanical mapping of the N5W mine", **BVP internal report for Vale mining company**, 61 ps, original in Portuguese, (2011).
- Constantini, M., “A Novel Phase-Unwrapping Algorithm based on Network Programming”, **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, vol. 36, no. 3, May, 813-820 (1998).
- Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., “Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry”, **Engineering Geology**, 79, 81-91 (2005).
- Goldstein, R.M., Werner, C.L., “Radar interferogram filtering for geophysical applications “**Geophysical Research Letters** 25 (21), 4035-4038 (1998).
- 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).
- 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).
- Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A., “Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images”. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, 41 (10), 2243-2253 (2003)
- Paradella W. R., Cheng, P., “Using GeoEye-1 Stereo Data in Mining Applications: Automatic DEM Generation”, **Geoinformatics**, v. Jan-Feb, 10-12, (2013).
- 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).
- Vale S.A. "Geotechnical evaluation for the cracks area in the Raymundo Mascarenhas road and cut slopes of the N5W pit, N5W iron mine", **Vale's internal report**, 17 ps., original in Portuguese, (2012).
- Werner, L. C., Wegmueller, 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).