

# ESTIMATIVA DE DEFORMAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL COM O USO DE INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL (DINSAR) EM DUAS ÓRBITAS DE UMA MINA DE FERRO A CÉU ABERTO EM CARAJÁS-PA

Victória Maria Gomes Velame<sup>1</sup>, Fábio Furlan Gama<sup>2</sup>

National Institute for Space Research – INPE, Av. dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja, São José dos Campos – SP, 12227-010, Brazil; {<sup>1</sup>victoria.velame, <sup>2</sup>fabio.furlan}@inpe.br

## RESUMO

Este trabalho objetiva investigar o potencial uso de dados SAR de satélites com órbitas ascendentes e descendentes para medir os valores reais de deformação do solo na vertical e horizontal (leste-oeste), ao invés de obter medidas de deformação na direção de visada (LoS, line-of-sight). Neste trabalho foram utilizados dados A-DInSAR de deformação em LoS, gerados pela técnica Small Baseline Subset (SBAS), de uma mina de ferro localizada na Província Mineral de Carajás (PA-Brasil) usando um conjunto de 33 cenas Stripmap TerraSAR-X adquiridas ao longo de um ano, a partir março de 2012 a abril de 2013. Como para estas cenas foram obtidas apenas medidas na órbita ascendente, simulou-se as medidas na órbita descendente com a adição de 200 graus no ângulo de azimute. Os dados das duas órbitas foram utilizados para calcular a deformação vertical e horizontal (leste-oeste) da mina de Carajás.

**Palavras-chave** – DInSAR, ascendente, descendente, mina de ferro.

## ABSTRACT

*This work aims to investigate the potential use of SAR data from ascending and descending orbits satellites to measure the real vertical and horizontal (east-west) ground deformation values instead of the LoS (line-of-sight) deformation. This work uses A-DInSAR data generated by the Small Baseline Subset (SBAS) technique LoS deformation measurement of one pit iron mine located in the Carajás Mineral Province (PA-Brazil) using a set of 33 TerraSAR-X Stripmap scenes acquired along a year, from March 2012 to April 2013. This scenes were only from ascending orbit, as we had no access to descending orbit data into this region and date, we simulated the descending data with the addition of 200 degrees in the azimuth angle of the ascending data. The ascending and simulated descending orbit data were used to simulate the vertical and east-west real ground deformation of Carajás mine.*

**Key words** – DInSAR, ascending, descending, iron mine.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo e a análise de deformações temporais de superfícies são importantes para investigar a estabilidade do solo, de forma a evitar futuros acidentes que podem ter perdas materiais e humanas. Em minas a céu aberto, a

estabilidade do solo deve ser monitorada constantemente, pois a instabilidade da superfície é uma fonte potencial de riscos para a operação e o pessoal envolvido, podendo comprometer a produção e os custos do empreendimento [1].

Atualmente o monitoramento de deformação mais utilizado é através de métodos clássicos como nivelamento óptico, estação total/prismas refletivos ou Global Positioning System (GPS) [1, 2]. Este tipo de levantamento fornece informações pontuais com precisão sub-milimétrica a centimétrica de áreas localizadas, cujas medidas de deslocamentos verticais apresentam menor acurácia que os movimentos horizontais, além de apresentar restrições operacionais e financeiras da quantidade de estações a serem utilizadas para uma dada área [1].

Em alguns casos, onde as áreas a serem monitoradas são extensas, são realizados aerolevantamentos com scanners laser (LIDAR), que não fornecem medidas em tempo real, ou são utilizados radares de solo (ground-based Radar), que realizam medidas em tempo real mas possuem um campo de visada restrito a bancada sob iluminação, não fornecendo informação sob visão sinóptica [1].

Técnicas de interferometria diferencial (DInSAR) que utilizam dados de satélites orbitais com Radar de Abertura Sintética (SAR) são capazes de avaliar a estabilidade superficial de minas operadas a céu aberto, oferecendo vantagens como: menor custo de imageamento, ampla área de cobertura, elevada acurácia (centimétrica até milimétrica), aquisição de dados de modo sistemático e com geometria controlada. A técnica DInSAR clássica explora a informação contida na fase de radar de, no mínimo, três imagens complexas, adquiridas em diferentes épocas, sobre uma mesma área e que formam dois pares interferométricos [1]. Essas imagens devem ter alta coerência para eliminar erros atmosféricos e geométricos, que causam variações de fase devido a alterações de trajetória orbital, efeitos atmosféricos, relevo topográfico, dentre outros. Com estas condições satisfeitas, pode-se obter a deformação temporal no terreno com direção ao longo da linha de visada (LoS) sensor-alvo. A técnica DInSAR tem sido utilizada, com resultados significativos, em várias aplicações como: monitoramento de deformações ligadas a terremotos [3], vulcanismos [4], mineração [5] e deslizamentos de terra [6].

A técnica de interferometria diferencial proposta por [7], PSInSAR, faz uso de espalhadores pontuais persistentes (PS) com o objetivo de eliminar o efeito atmosférico na fase do sinal melhorando a acurácia da medida. Tipicamente, alvos que se comportam como PS são refletores de radar estáveis, estruturas construídas pelo homem ou alvos naturais. A técnica PSInSAR utiliza grandes conjuntos de dados de

imagens para gerar interferogramas diferenciais em relação a uma imagem referência (mestre), comum a todas.

A técnica Small Baseline Subset (SBAS) desenvolvida por [8] é baseada no uso de subconjuntos de pequenas linhas base para gerar uma seleção adequada dos pares de imagens SAR, essa técnica é capaz de fornecer um mapa denso de medidas de deformação. Os pares de imagens SAR são caracterizados por uma pequena separação temporal e espacial entre as órbitas de aquisição, reduzindo assim o fenômeno decorrelação e os erros topográficos.

A técnica SqueeSAR desenvolvida por [9] trata os espalhadores persistentes (PS), juntamente com espalhadores distribuídos (DS), objetivando aumentar a quantidade de pontos amostrados do terreno da técnica PSInSAR, aumentando a capacidade de detecção de movimento superficial.

O uso de imagens do satélite TerraSAR-X na detecção de instabilidades de bancadas e infraestrutura mineiras na mina de ferro à céu aberto localizada na Província Mineral de Carajás (PA-Brasil) utilizando técnicas as SqueeSAR, SBAS e IPTA de Interferometria Diferencial Avançada (A-DInSAR) mostraram-se efetivos para o monitoramento da deformação superficial em minas a céu aberto, tornando-se estratégicos para o seu planejamento operacional [1, 10–14].

Continuando o estudo das técnicas de interferometria SAR para análise de deformações nas minas da província de Carajás, pretende-se analisar e investigar o potencial do uso de satélites SAR em órbitas ascendentes e descendentes para medir os valores reais de deformação do solo nas direções vertical e horizontal (sentido leste-oeste) em vez da deformação na linha de visada (LoS) sensor-alvo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

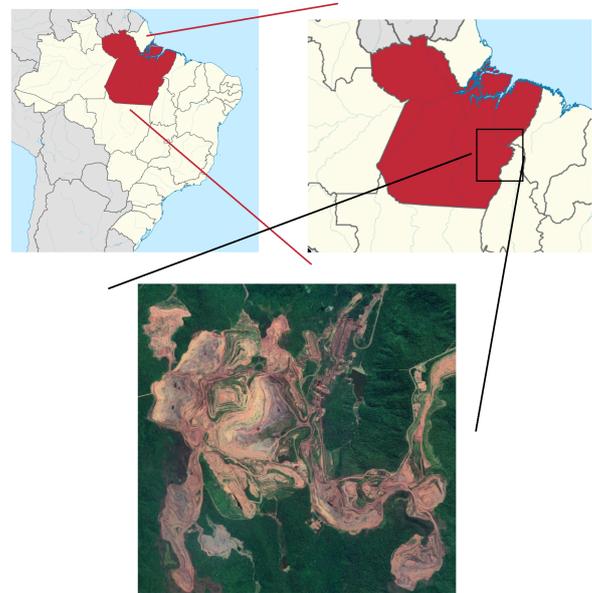
Neste trabalho foram utilizados dados de deformação adquiridos pela técnica A-DInSAR SBAS da mina de ferro localizada na Província Mineral de Carajás (PA-Brasil), os dados são um conjunto de 33 cenas TerraSAR-X Stripmap adquiridas ao longo de um ano, a partir de março de 2012 até abril de 2013. As deformações adquiridas pelo método SBAS representam a deformação de cada ponto na direção LoS para um determinada data, sendo a cena mais recente da região a imagem de referência, portanto com deformação nula.

Como essas cenas foram obtidas apenas na órbita ascendente, foram simuladas medidas na órbita descendente com a adição de 200 graus no ângulo de azimute dos dados ascendentes.

### 2.1. Área de Estudo

A área de estudo é mostrada na Figura 1, onde fica situada a mina de ferro a céu aberto situada na região de Carajás, localizada na Província Mineral de Carajás, estado do Pará, Brasil. Sendo a mais importante província mineral do Brasil, particularmente com a mina de ferro N4E considerada a maior mina do mundo em volume extraído e por sua extensão linear (mais de 4 km) [1]. Está área é caracterizada por chuvas torrenciais e é marcada por terrenos montanhosos (altitudes de 500 a 900 m), caracterizada por colinas e planaltos rodeados por sul e norte terras baixas, intemperismo químico

profundo que produz latossolos densos, totalmente cobertos pela floresta equatorial Ombrófila [1].



**Figure 1: Área de Estudo: mina de ferro a céu aberto situada na região de Carajás (PA-Brasil).**

Esse complexo de mineração apresenta uma intensa extração dinâmica de minério utilizando explosivos, bulldozers e caminhões de grande porte, nos quais durante o processo de extração de minério, o material residual é separado do minério e depositado em pilhas [1, 12].

Instabilidades de superfície podem ser esperadas em qualquer atividade de mineração. Movimentos de massa rochosa e deformações superficiais potencialmente levam a instabilidades de encostas ou falhas na parede devido a operações regulares de mineração a céu aberto [1]. Esse cenário em Carajás piora com o tempo devido às intensas escavações em solo saprolítico e massas rochosas de muito baixa qualidade geomecânica, juntamente com práticas de jateamento e precipitação intensa dos trópicos úmidos, com efeitos deletérios sobre a estabilidade geral [1]. A mineradora Vale, com sua equipe de geotecnia, monitorou a presença de fraturas em paredes de bancada, trincas de tensão em bermas e rampas rodoviárias, por meio de inspeção visual, medições de prismas de estação total/refletora e radar terrestre [1]. As Figuras 2 e 3 mostram algumas dessas fraturas.



**Figure 2: N5W meu com evidência de banco rachado. Fonte: [1].**



Figure 3: NSW meu com evidência de buracos na estrada de acesso. Fonte: [1].

## 2.2. Método Proposto

Com dados de SAR adquiridos por meio de órbitas em visadas quase-opostas (órbitas ascendentes e descendentes) é possível recuperar os componentes de deslocamento leste-oeste e vertical, combinando apropriadamente as estimativas de deformação de LoS das órbitas ascendente e descendente. A Figura 4 mostra de maneira simplificada a geometria SAR para cálculo de deformação vertical e leste-oeste.

Portanto, os dados de deformação obtidos pelo método SBAS foram divididos em ascendentes e descendentes simulados, como explicado acima, para se realizar a estimativa de deformação vertical e leste-oeste. Para realizar estas estimativas foi desenvolvido um software na linguagem de programação Python.

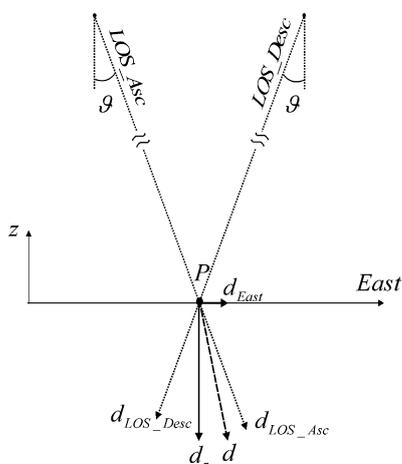


Figure 4: Simplificação da geometria SAR no plano Leste-Z com o vetor de deslocamento ( $d$ ), suas projeções LOS  $d_{LOS_{Asc}}$  e  $d_{LOS_{Desc}}$  e os componentes de deformação leste-oeste ( $d_{East}$ ) e vertical ( $d_z$ ). Fonte: [4].

## 3. RESULTADOS

Aplicando a técnica de estimativa de interferometria SAR para estimar a movimentação nas direções vertical e leste para os dados simulados da área de estudo, mina de Carajás, obteve-se o resultado de deformação vertical de cada ponto para as datas disponíveis.

Para encontrar os pontos equivalente das órbitas ascendentes e descendentes é realizada um busca dentro de um raio de 5m, parâmetro este que pode ser alterado. Para efetuar esta busca uma órbita é selecionada como mestre e a outra como escrava, então para cada ponto mestre

faz-se a busca pelo ponto escravo mais próximo dentro do raio definido. Para cada par de pontos (mestre e escravo) é necessário fazer uma nova busca para encontra as datas equivalentes, dentro de um intervalo máximo de dias (22 dias), e fazer a interpolação para estimar a deformação nas datas da imagem mestre. Para cada conjunto de pontos mestre com par escravo existente e data é calculada a deformação nas direções vertical e leste segundo cálculos vetoriais da órbitas ascendentes e descendentes.

Portanto, como resultado para cada ponto mestre com par de distância existente é estimada a deformação temporal em ambas as direções, desta série temporal estima-se a velocidade em ambas direções de deformação em mm/ano para cada ponto mestre. Os resultados das velocidades das deformações anuais em milímetros para as direções vertical e leste são mostrados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Estes resultados demonstram a aplicação das técnicas de interferometria SAR para estimar as deformações em grandes áreas, como a área de estudo da mina de Carajás, e analisar as deformações em duas direções.

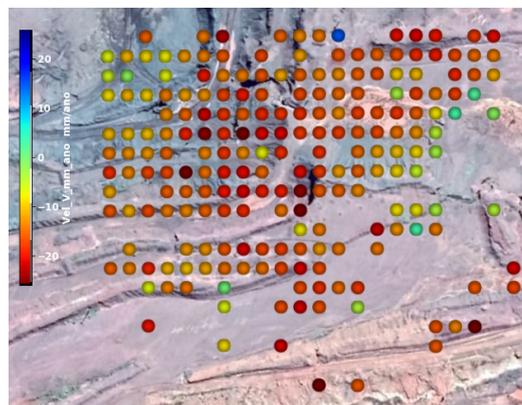


Figure 5: Estimativa de velocidade na direção vertical em mm/ano.

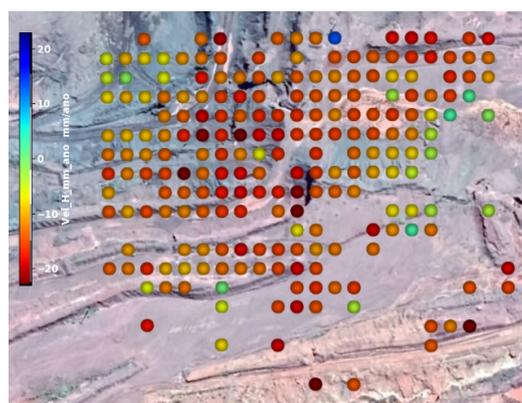


Figure 6: Estimativa de velocidade na direção leste em mm/ano.

## 4. CONCLUSÕES

Por meio deste estudo, foi possível concluir a importância do uso de interferometria SAR na análise de deformações de superfície terrestre. As técnicas de DInSAR permitem estimar com precisão milimétrica as deformações em grande áreas com baixos custos.

Além disso, explorar novas técnicas DInSAR pode agregar melhor acurácia nos estudos e proporcionar aumento na quantização da área de deformação analisada, assim aumentando a eficiência e a aplicabilidade das técnicas.

Explorar o uso de órbitas ascendentes e descendentes são de fundamental importância para se estimar a velocidade da deformação para cada direção, podendo deste modo analisar melhor a movimentação de grande massas de terreno e prevenir a ocorrência de acidentes em ambientes de mineração, obras civis, e mesmo em desastres naturais.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os pesquisadores agradecem a CAPES, pelo apoio financeiro, à Airbus/Visiona pelas imagens TerraSAR cedidas, e ao INPE pelo apoio com a infraestrutura necessária à elaboração deste trabalho. O

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] GAMA, F. F. et al. Monitoring subsidence of open pit iron mines at Carajás Province based on SBAS interferometric technique using TerraSAR-X data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Elsevier, v. 8, p. 199–211, 2017.
- [2] VAZIRI, A.; MOORE, L.; ALI, H. Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines. *Natural hazards*, Springer, v. 55, n. 2, p. 501–512, 2010.
- [3] MASSONNET, D. et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 364, n. 6433, p. 138, 1993.
- [4] MANZO, M. et al. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Elsevier, v. 151, n. 4, p. 399–416, 2006.
- [5] JAROSZ, A.; WANKE, D. Use of InSAR for monitoring of mining deformations. In: *Proc. of FRINGE 2003 Workshop, Frascati, Italy*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1–5.
- [6] COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering geology*, Elsevier, v. 88, n. 3-4, p. 173–199, 2006.
- [7] FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 39, n. 1, p. 8–20, 2001.
- [8] BERARDINO, P. et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 40, n. 11, p. 2375–2383, 2002.
- [9] FERRETTI, A. et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 49, n. 9, p. 3460–3470, 2011.
- [10] PARADELLA, W. R. et al. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 193, p. 61–78, 2015.
- [11] MURA, J. C. et al. Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR time-series: a case study in the N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIV*. [S.l.], 2014. v. 9243, p. 924311.
- [12] PINTO, C. de A. et al. Results of the application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in the azul open pit manganese mine (Carajás Province, Amazon region) using TerraSAR-X data. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V*. [S.l.], 2014. v. 9245, p. 924510.
- [13] GAMA, F. F. et al. Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto–SBSR, Foz do Iguaçu-PR*, 2013.
- [14] HARTWIG, M. E.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C. Detection and monitoring of surface motions in active open pit Iron mine in the Amazon region, using persistent scatterer interferometry with TerraSAR-X satellite data. *Remote Sensing, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 5, n. 9, p. 4719–4734, 2013.