



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.31.21.40-TDI

**DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS NO
COMPLEXO MINERADOR DE GERMANO,
MARIANA-MG, COM TÉCNICA INTEGRADA DE
A-DINSAR UTILIZANDO DADOS TERRASAR-X**

Priscila Negrão

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. José Cláudio Mura, e
Fábio Furlan Gama, aprovada em
20 de agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RNQEJS>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.31.21.40-TDI

**DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS NO
COMPLEXO MINERADOR DE GERMANO,
MARIANA-MG, COM TÉCNICA INTEGRADA DE
A-DINSAR UTILIZANDO DADOS TERRASAR-X**

Priscila Negrão

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. José Cláudio Mura, e
Fábio Furlan Gama, aprovada em
20 de agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RNQEJS>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Negrão, Priscila.

N312d Detecção de deslocamentos superficiais no Complexo Minerador de Germano, Mariana-MG, com técnica integrada de A-DInSAR utilizando dados TerraSAR-X / Priscila Negrão. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xx + 82 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.31.21.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. José Cláudio Mura, e Fábio Furlan Gama.

1. Barragem de rejeitos. 2. Mineração a céu aberto. 3. Germano. 4. A-DInSAR. 5. TerraSAR-X. I.Título.

CDU 528.8:622.271.32



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).


This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Priscila Negrão**

Título: "DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS NO COMPLEXO MINERADOR DE GERMANO, MARIANA-MG, COM TÉCNICA INTEGRADA DE A-DINSAR UTILIZANDO DADOS TERRASSAR-X"


Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Sensoriamento Remoto**

Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna



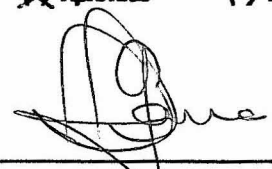
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP
 Participação por Video - Conferência
 Aprovado Reprovado

Dr. José Claudio Mura



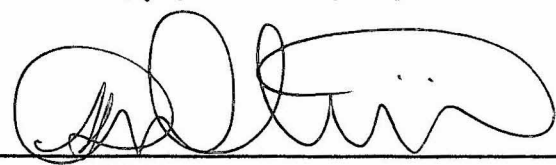
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP
 Participação por Video - Conferência
 Aprovado Reprovado

Dr. Fábio Furlan Gama



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP
 Participação por Video - Conferência
 Aprovado Reprovado

Dr. Cleber Gonzales de Oliveira



Comitê(a) / VISIONA / São José dos Campos - SP
 Participação por Video - Conferência
 Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 20 de agosto de 2018

“A sabedoria consiste em compreender que o tempo dedicado ao trabalho nunca é perdido”.

Ralph Waldo Emerson

Aos meus pais, Laudemir e Cleusa, por sempre terem me incentivado a continuar meus estudos.

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho acadêmico é resultado da contribuição de muitas pessoas. Para conseguir aplicar uma técnica é necessário fundamentar-se em trabalhos desenvolvidos e resultados discutidos por outros pesquisadores. Além disso, no caminho, muitas dificuldades técnicas e muitas dúvidas aparecem, e nessa hora as dicas, as sugestões e as ideias que surgem em uma orientação ou mesmo em uma conversa com colegas podem ser a solução de um problema. As dificuldades por vezes nos fazem acreditar de que não seremos capazes de concluir o trabalho e para que consigamos nos manter firmes em nossa caminhada, precisamos de pessoas que nos apoiam e acreditam em nós. A todas essas pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, declaro o meu imenso agradecimento.

A Deus, que me proporcionou tantas oportunidades, guiou-me por bons caminhos e me cercou de pessoas tão capacitadas e de bem, a minha eterna gratidão.

Agradeço aos meus orientadores, Mura e Fábio, pela confiança depositada em mim desde a seleção até o fim do trabalho, garantindo que eu tivesse a oportunidade de realizar meu mestrado no INPE e desenvolver um trabalho na área de monitoramento de barragens com imagens SAR. O trabalho aqui desenvolvido agregou muito na minha formação profissional, portanto gostaria de manifestar minha gratidão pela oportunidade que tive. Agradeço, em especial, ao Mura pela paciência em ensinar e a disposição em explicar todos os detalhes do processamento com o software utilizado no trabalho.

Agradeço aos meus pais, por me apoiarem e me incentivarem durante toda a minha vida acadêmica. Graças a eles, não me faltou apoio emocional durante toda a minha formação. Agradeço também aos meus irmãos e demais familiares que acreditaram em mim.

Ser mestrando nos tira o equilíbrio e a paz algumas vezes, e são pessoas que nos ajudam a tê-los de volta. Por isso, sou muito grata ao Diego, pelo carinho e

palavras de motivação sempre constantes. Agradeço ainda a ele por ter me mostrado novos caminhos e novas oportunidades, motivando-me a perseverar nos estudos. Às minhas amigas, Natália e Paula, sou muito grata por ter dividido não somente a moradia nesse período, mas as alegrias, as tristezas e as angústias. A elas, minha gratidão por terem me escolhido mesmo sem ainda me conhecer.

Aos colegas de interferometria e de sala, Filipe e Guilherme, agradeço pela contínua disponibilidade em me ajudar a entender melhor dessa tão fantástica e complexa técnica.

Agradeço à minha turma, “Segunda C”, pela alegria, pelos momentos de descontração, pelas confraternizações e pelos almoços no Trairão, seguidos dos cafezinhos com prosa no LTID. Esses momentos de convivência diária tornavam o trabalho mais leve e deixarão muita saudade. Agradeço especialmente aos meus amigos Alindomar, Bárbara, Camile e Jéssica, cujas amizades foram um verdadeiro presente.

Agradecimento especial a Waldiza e ao Cleber da empresa VISIONA TECNOLOGIA ESPACIAL S.A. pela geração e disposição do Modelo Digital de Superfície gerado a partir das imagens Pléiades, e a AIRBUS D&S, pelo fornecimento do conjunto de dados TerraSAR-X. Sem esses insumos seria impossível a realização deste trabalho. Agradecimento também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Agradecimento especial também ao Samuel de empresa SAMARCO pela disposição das medidas topográficas nos diques e barragens, bem como no acompanhamento do trabalho de campo.

A todos os citados e aos demais que contribuíram para a realização deste trabalho, os meus mais sinceros e profundos agradecimentos.

RESUMO

O monitoramento de estruturas em ambientes de mineração é uma atividade de fundamental importância e é realizada por diversos métodos, como levantamentos topográficos, radares de solo, posicionamento por GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), entre outros. A denominação de Interferometria Diferencial Avançada (*Advanced Differential SAR interferometry* – A-DInSAR) é dada às técnicas de Interferometria Diferencial (DInSAR) realizadas com uma série temporal de imagens SAR. Com a utilização de A-DInSAR é possível analisar o comportamento de uma deformação ao longo do período compreendido pela série e ter uma visão sinóptica de toda a área da mineração apresentada na imagem.

Em 5 de novembro de 2015, a barragem de rejeitos do Fundão, localizada no complexo minerário de Germano, no município de Mariana-MG, rompeu-se. Essa barragem mantinha um volume de rejeitos de aproximadamente 55 milhões de m³, dos quais, 32,6 milhões de m³ foram lançados no Rio Gualaxo do Norte e seguiram seu percurso até o Rio Doce. Esse acidente é considerado o maior desastre socioambiental da história Brasileira e o maior do mundo envolvendo barragem de rejeitos.

Considerando o contexto da área de estudo e a aplicabilidade da técnica, este trabalho apresenta uma investigação no complexo minerário de Germano durante um ano após o acidente, utilizando uma integração de duas técnicas A-DInSAR, com o objetivo de fornecer informações úteis sobre a detecção de deslocamento do solo para alarme, planejamento e avaliação de risco. Neste trabalho utilizou-se um conjunto de 30 imagens TerraSAR-X adquiridas no período de novembro de 2015 a outubro de 2016 em modo ascendente. A análise foi realizada com a integração das técnicas DInSAR Time Series (DTS) e Persistent Scatterer Interferometry (PSI), com o objetivo de detectar movimentos lineares e não-lineares no solo. Para realizar o método integrado das técnicas, inicialmente foi feito o processamento com a técnica DTS e seus

resultados de deslocamento e de componente topográfica foram utilizados como dados de entrada para o processamento PSI.

O resultado final de deslocamento, obtido do processamento integrado, foi comparado com dados de deslocamento obtidos com levantamento topográfico, utilizando estação total e prismas refletivos.

Os resultados do processamento integrado A-DInSAR apresentaram padrões de estabilidade em boa parte das estruturas, e estão de acordo com as medidas topográficas. As áreas localizadas em reservatório de rejeitos finos apresentaram um grau de subsidência causado pela compactação do solo devido à interrupção do processo de mineração, o que levou a deposição do rejeito no fundo do reservatório. Os diques auxiliares apresentaram compactação do solo causada pelo tráfego contínuo de caminhões. O uso desta combinação de técnicas de A-DInSAR mostrou resultados precisos no monitoramento de deslocamento de superfície em uma grande área de mineração, fornecendo informações muito úteis sobre o movimento do solo para planejamento e controle de riscos.

DETECTION OF SURFACE DISPLACEMENTS IN THE GERMANO MINING COMPLEX, MARIANA-MG, WITH INTEGRATED A-DINSAR TECHNIQUE USING TERRASAR-X DATA

ABSTRACT

The monitoring of structures in mining environments is an activity of fundamental importance and is performed by several methods, such as topographic surveys, ground radars, positioning by GNSS (Global Navigation Satellite Systems), among others. The name of Advanced Differential Interferometry (A-DInSAR) is given to Differential Interferometry (DInSAR) techniques performed with a time series of SAR images. With the use of A-DInSAR it is possible to analyze the behavior of a deformation throughout the period comprised by the series and to have a synoptic view of the entire mining area presented in the image.

On November 5, 2015, the Fundão tailings dam, located in the Germano mining complex, in the municipality of Mariana-MG, collapsed. This dam had a volume of tailings of approximately 55 million m³, of which 32.6 million m³ were launched in the Rio Gualaxo do Norte and followed its route to Rio Doce. This accident is considered the largest socio-environmental disaster in the Brazilian history and the largest in the world involving tailings dam.

Considering the context of the study area and the applicability of the technique, this work presents an investigation of the Germano mineral complex during one year after the accident, using an integration of A-DInSAR techniques, in order to provide useful information on the detection of ground displacement for alarm, planning and risk assessment. In this work we used a set of 30 TerraSAR-X images acquired from November 2015 to October 2016 in ascending mode.

The analysis was performed with the integration of the DInSAR Time Series (DTS) and Persistent Scatterer Interferometry (PSI) techniques, in order to detect linear and nonlinear ground displacements. To perform the integrated method of the techniques, the DTS technique was initially processed and its

displacement and topographic component results were used as input data for PSI processing.

The final displacement result, obtained from the integrated processing, was compared with displacement data obtained with topographic survey, using total station and reflective prisms.

The results of A-DInSAR integrated processing showed stability patterns in most of the structures, and are in accordance with topographic measurements. The areas located in the reservoir of fine tailings presented a degree of subsidence caused by soil compaction due to the interruption of the mining process, which led to the deposition of the tailings at the bottom of the reservoir. Auxiliary dams presented ground compaction caused by the continuous traffic of trucks. The use of this combination of A-DInSAR techniques showed good results in tracking surface displacement in a large mining area, providing very useful information on ground displacement for risk planning and control.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|--------------------|
| Figura 2.1 - Geometria do Imageamento SAR. | 9 |
| Figura 2.2 - Modos de Imageamento do satélite TerraSAR. | 11 |
| Figura 2.3 - Compressão do sinal SAR. | 12 |
| Figura 2.4 - Geometria de aquisição de imagens para Interferometria SAR. ... | 14 |
| Figura 2.5 - Padrões do tipo franja em interferograma. | 15 |
| Figura 2.6 - Princípio da DInSAR. | 18 |
| Figura 2.7 - Amostragem do fenômeno com DInSAR simples e A-DInSAR. | 22 |
| Figura 2.8 - Espalhadores persistentes em uma célula de resolução. | 27 |
| Figura 2.9 - Pares interferométricos PSI e componentes de fase de um espalhador persistente. | 29 |
| Figura 2.10 - Ilustração a modelagem de processamento da metodologia IPTA. | 30 |
| Figura 3.1 - Localização da área de estudo e setorização das estruturas. | 32 |
| Figura 3.2 - Distrito de Bento Rodrigues antes (20 de julho de 2015) e depois do acidente (9 de novembro de 2015). | 34 |
| Figura 4.1 - Área de abrangência da cena TerraSAR-X. | 36 |
| Figura 4.2 - MDS utilizado para estimativa da fase topográfica. | 38 |
| Figura 4.3 - Estação total (a) e prisma (b) utilizados no levantamento de campo. | 39 |
| Figura 4.4 - Fluxograma geral do trabalho. | 40 |
| Figura 4.5 - Fluxograma do processamento DTS. | 41 |
| Figura 4.6 - Pares interferométricos utilizados na análise DTS e linhas de base. | 42 |
| Figura 4.7 - Fluxograma do processamento integrado DTS-PSI. | 44 |
| Figura 4.8 - Pares interferométricos utilizados na análise PSI e linhas de base. | 45 |
| Figura 4.9 - Localização dos marcos de centragem forçada. | 49 |
| Figura 5.1 - Mapa de deslocamento com DTS. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.2 - Mapa de erros do MDS obtido com DTS. | 52 |
| Figura 5.3 - Deslocamentos detectados com a DTS na Baía 3. | 53 |
| Figura 5.4 - Deslocamentos detectados com a DTS no dique de Sela & Tulipa. | 54 |
| Figura 5.5 - Deslocamentos detectados com a DTS no dique de Selinha. | 54 |
| Figura 5.6 - Deslocamentos detectados com a DTS no Barramento Principal. | 55 |
| Figura 5.7 - Mapa de velocidade de deslocamento da técnica integrada DTS e PSI. | 56 |
| Figura 5.8 - Mapa do desvio padrão das taxas de deslocamento superficiais. | 58 |
| Figura 5.9 - Dique de Sela & Tulipa. | 59 |
| Figura 5.10 - Reservatório de Fundação (vazio)..... | 59 |
| Figura 5.11 – Mapa de velocidade de deslocamento e pontos monitorados no dique de Sela & Tulipa. | 60 |
| Figura 5.12 - Gráficos com os deslocamentos em LoS obtidos com o processamento PSI e as medições topográficas para os pontos ST1, ST2, ST3, ST4, ST5 e ST6..... | 61 |
| Figura 5.13 - Gráficos com os deslocamentos em LoS obtidos com o processamento PSI e as medições topográficas para os pontos ST7, ST8, ST9, ST10, ST11 e ST12..... | 62 |
| Figura 5.14 - Dique de Selinha..... | 64 |
| Figura 5.15 - Mapa de velocidade de deslocamento e pontos monitorados no dique de Selinha..... | 65 |
| Figura 5.16 - Gráficos com os deslocamentos em LoS obtidos com o processamento PSI e as medições topográficas para os pontos SL1, SL2, SL6 e SL7..... | 66 |
| Figura 5.17 – Barramento Principal onde esta localizado o ponto P2 (a) e pontos analisados no mapa de deslocamento (mm/ano) na barragem de Germano. | 68 |
| Figura 5.18 - Deslocamentos acumulados em LoS nos pontos P1, P2, P3 e P4 durante o período de novembro de 2015 a outubro de 2016. | 69 |
| Figura 5.19 - Diques auxiliares no setor D. | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.20 - Barragem e reservatório Baía 3 no setor E. | 70 |
| Figura 5.21 – Mapa de deslocamento em LoS (mm/ano) nos setores D e E. ... | 71 |
| Figura 5.22 - Deslocamento acumulado em LoS nos pontos Q1, Q2, Q3 e Q4. | 72 |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|--------------------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 6 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 6 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 6 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 8 |
| 2.1 Princípios básicos do imageamento por radar..... | 8 |
| 2.2 Geometria do imageamento SAR..... | 8 |
| 2.3 Modos de imageamento SAR | 10 |
| 2.4 Imagem SAR | 11 |
| 2.5 Interferometria SAR (InSAR) | 13 |
| 2.6 Coerência interferométrica..... | 16 |
| 2.7 Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)..... | 17 |
| 2.8 Interferometria Diferencial Avançada (A-DInSAR)..... | 21 |
| 2.8.1 Séries temporais de interferometria diferencial SAR (DInSAR Time series - DTS) | 23 |
| 2.8.2 Interferometria por espalhadores persistentes (<i>Persistent Scatterers Interferometry</i> – PSI)..... | 26 |
| 3 ÁREA DE ESTUDO | 32 |
| 4 materiais e métodos..... | 35 |
| 4.1 Conjunto de dados..... | 35 |
| 4.1.1 Imagens TerraSAR-X..... | 35 |
| 4.1.2 Modelo Digital de Elevação (MDS)..... | 37 |
| 4.1.3 Dados de levantamentos de campo | 38 |
| 4.2 Softwares utilizados..... | 39 |
| 4.3 Métodos..... | 39 |
| 4.3.1 Processamento DTS | 40 |
| 4.3.2 Técnica Integrada DTS e PSI..... | 43 |
| 4.3.3 Levantamento de campo..... | 47 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 50 |
| 5.1 | Resultados DTS..... | 50 |
| 5.2 | Resultado da técnica integrada DTS e PSI..... | 55 |
| 5.2.1 | Deslocamentos nos diques de Sela & Tulipa | 58 |
| 5.2.2 | Deslocamentos no dique de Selinha | 64 |
| 5.2.3 | Deslocamentos no Barramento Principal | 67 |
| 5.2.4 | Deslocamentos na Baía 3 e nos acessos para veículos | 69 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 73 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

1 INTRODUÇÃO

Atividades mineradoras em minas a céu aberto podem causar deformações superficiais em extensas áreas, incluindo porções do terreno adjacentes à cava da mina. A causa da deformação pode estar associada a movimentos de massas de rochas, inclinação acentuada dos taludes da mina, eventos climáticos e outros fatores presentes no processo de mineração a céu aberto (PARADELLA et al., 2015a).

Uma falha da estrutura minerária ou colapso de uma escavação podem levar a impactos sociais, econômicos e ambientais. O monitoramento é uma ferramenta inestimável para avaliar o desempenho e o risco de falha do projeto do talude de uma mina a céu aberto, além de auxiliar na minimização do risco. (HAWLEY et al., 2009).

Os sistemas de monitoramento quantitativo em minas a céu aberto, geralmente, envolvem instrumentos para medidas de movimentações superficiais e subterrâneas. No contexto de movimentações na superfície, alguns métodos se apresentam como eficientes componentes para avaliações quantitativas de monitoramento, como: inspeção visual, levantamento topográfico planialtimétrico, levantamento geodésico com sistema de posicionamento por satélite (*Global Navigate Satellite System* - GNSS), fotogrametria, perfilamento a laser, radares de solo e orbitais (HAWLEY et al., 2009).

A técnica denominada Interferometria de imagens SAR (InSAR) baseia-se na diferença de fase entre *pixels* homólogos de, pelo menos, duas imagens SAR complexas, corrigidas e adquiridas com pequenas diferenças de geometrias de aquisição. Através da diferença de fase, ou fase interferométrica, proveniente dessa pequena diferença de geometria, 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). Através da combinação coerente dos sinais recebidos pelas duas antenas, a diferença de fase, ou fase interferométrica, entre esses sinais pode ser calculada para cada *pixel* da imagem e, com o conhecimento da geometria da aquisição (vetor de estado do posicionamento do sensor), a diferença de fase pode ser convertida na altitude de cada *pixel* da imagem (ROSEN et al., 2000).

A técnica InSAR permite a obtenção de posições tridimensionais com precisão, muitas vezes, melhores que aquelas obtidas por estereoscopia de imagens ópticas e de radar, 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 superfície (MDS). Exemplos de missões que geraram MDS são a TOPSAR, descrito por Zebker et al. (1992b), a SRTM, descrito por Farr e Kobrick (2000) e também a TanDEM-X, sendo que as duas últimas produziram MDS's com um recobrimento quase integral da superfície terrestre.

Derivada da InSAR, a Interferometria Diferencial de Imagens SAR (DInSAR) é uma técnica cujo processamento consiste na diferença da fase interferométrica de duas imagens adquiridas em tempos distintos para a determinação de deslocamentos ocorridos na linha de visada do sensor (*line of sight* – LoS) entre as aquisições das imagens. Enquanto a InSAR visa a determinação da topografia da superfície imageada, a DInSAR tem por objetivo determinar deslocamentos, valendo-se, na maioria das vezes, de uma informação prévia da topografia, como um modelo digital de superfície (MDS). A partir do MDS é possível estimar a fase correspondente à topografia. Na DInSAR é necessário isolar a componente de fase do deslocamento das demais componentes, que são: erro residual de estimativa da fase topográfica, atraso de fase causado pela atmosfera, erros de órbita do sensor e ruídos (do sensor SAR, *speckle*, etc).

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 grandes extensões (MASSONET et al., 1993). 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. A DInSAR realizada em sua forma padrão (configurada com duas imagens) é limitada na determinação dos deslocamentos e na modelagem do atraso de fase causado pela atmosfera. Uma melhora significativa na qualidade dos resultados das aplicações da técnica foi obtida com novos métodos utilizando uma série temporal de imagens SAR adquiridas sobre o mesmo fenômeno de deformação, trata-se das técnicas Avançadas de DInSAR (A-DInSAR) (CROSETTO et al., 2005).

As técnicas A-DInSAR englobam diversas abordagens que exploram *pixels* homólogos de uma série temporal de imagens SAR. Com essas técnicas, a amostragem do fenômeno de deformação é maior e assim é possível aplicá-la a trabalhos de monitoramento de deformações em superfícies, causados pelos mais diversos tipos de fenômenos geotécnicos, dentre outras aplicações. As técnicas A-DInSAR fornecem acurácias centimétricas e até milimétricas na determinação de deformações em superfície, muitas vezes equiparando-se a métodos geodésicos de posicionamento. As técnicas A-DInSAR tem em comum a análise de uma pilha de imagens SAR, no entanto, parâmetros como critérios de seleção de pixel e pares utilizados para geração de imagens de diferença de fase (interferograma) podem ser variados. Duas importantes técnicas A-DInSAR são a Série Temporal DInSAR (*DInSAR Time Series - DTS*) e a Espalhadores Persistentes em Interferometria (*Persistent Scatterer Interferometry - PSI*). A DTS baseia-se no critério de coerência interferométrica para seleção de *pixels* e no conceito de linhas de base curtas (*Small Baseline Subset - SBAS*) (BERARDINO et al., 2002) para geração de pares interferométricos. A PSI baseia-se na dispersão de amplitude para selecionar

pixels estáveis ao longo da série temporal e referencia seus interferogramas a uma única imagem, denominada mestre (FERRETI et al, 2001; WERNER et al., 2003).

Devido à alta precisão das técnicas A-DInSAR, a validação da técnica requer dados ainda mais precisos da área de estudo, utilizando para isso equipamentos como: estações totais, receptores GNSS, radares de solo, *laser scanners* terrestre, entre outros, com alto custo de aquisição e de operação. Como a técnica é utilizada para detecção de deformação em fenômenos que ocorrem em grandes áreas, a validação em campo torna-se um processo difícil de ser realizado, em termos de custo e de tempo. Além disso, em alguns casos, como em ambientes de mineração, o acesso ao local pode ser difícil e até mesmo impossibilitado.

Devido a essas dificuldades inerentes aos processos de mensurações em campo, as técnicas A-DInSAR se tornam de grande empregabilidade em diversos setores, inclusive em operações de minas a céu aberto. Vários exemplos de aplicação podem ser citados, como o de Peltier et al. (2010), que utilizou a 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 por levantamentos GNSS. Lagios et al. (2012) estudou 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) aplicou a técnica de PSI para estudar uma subsidência na cidade do México, associada à retirada de água subterrânea, com a análise de 23 imagens Envisat ASAR (banda C).

No contexto de mineração, podem ser citados os trabalhos de Colesanti et al. (2005), o qual realizou um estudo de caso em uma região no leste da França, explorada desde 1870 até 1997, onde tinham sido identificados sinais precursores de colapso. Herrera et al. (2007), utilizou um método denominado *Coherent Pixels Technique* (CPT) para estudar o fenômeno de subsidência em

dois intervalos de tempo (janeiro de 1998 a dezembro de 2000 e março de 2003 a dezembro de 2004), na cidade de La Union, Espanha. Wegmuller et al. (2010) mostrou a viabilidade de detectar deformações não lineares na superfície, provocada por mineração de carvão subterrânea, utilizando dados do satélite TerraSAR-X, Paradella et al. (2015b) mostrou que uso integrado da técnica PSI junto com deslocamento de amplitude das imagens SAR possibilitou o monitoramento de altas taxas de deslocamento superficiais. Mura et al. (2016) utilizou uma técnica integrada de duas A-DInSAR (DTS e PSI) para detectar altas taxas de movimentos de lineares e não-lineares em superfícies utilizando uma série de 33 imagens TerraSAR-X da região amazônica. Os resultados obtidos indicaram que a técnica integrada (DTS e PSI) melhorou a capacidade de detectar movimentos não lineares, além de aumentar a densidade de *pixels* aptos à análise. Estudos atuais demonstram a eficácia destas técnicas, quando aplicadas ao monitoramento das deformações superficiais em áreas de mineração a céu aberto, como descritos em Pinto et al. (2015); Silva et al. (2017); Temporim et al. (2017).

De maneira geral, a técnica PSI fornece melhor acurácia que a técnica DTS porque permite modelar melhor o deslocamento e diminuir o efeito da fase atmosférica, que é uma limitação da DInSAR. Por outro lado, a DTS permite detectar deformações não-lineares e fornece informações de áreas mais extensas. Outra limitação da PSI está em detectar movimentos rápidos.

A técnica integrada, demonstrada por Mura et al. (2016), foi proposta para se beneficiar da acurácia da PSI e lidar com as limitações da DTS. Demonstrou-se com sucesso que a utilização das informações *a priori* da fase relacionada à deformação superficial e da fase relacionada ao erro da estimativa da fase topográfica a partir do MDS, obtidas do processamento DTS, incrementa a capacidade de detectar movimentos não lineares e aumenta a densidade de pontos monitorados com a técnica PSI.

Considerando um melhor desempenho que pode ser obtido com o uso da técnica integrada de DTS e PSI, este trabalho apresenta a sua aplicação em

uma série temporal de 30 imagens TerraSAR-X, adquiridas entre novembro de 2015 e outubro de 2016, com o objetivo de detectar deformações lineares e não-lineares na barragem de rejeitos de Germano e suas estruturas associadas. Essas estruturas estão localizadas no complexo de Germano, em Mariana-MG, no qual está também localizada a barragem do Fundão, que rompeu-se em novembro de 2015, caracterizando o maior desastre socioambiental da história do país e o maior do mundo envolvendo barragem de rejeitos. Esse acidente reforça a importância de se obter informações sobre fenômenos de deformação em áreas de mineração para análise de risco, alarme e planejamento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é detectar os deslocamentos superficiais no complexo minerário de Germano, através de uma série temporal de 30 imagens TerraSAR-X na linha de visada do satélite, compreendendo o período entre novembro de 2015 e outubro de 2016, com a utilização da técnica integrada de DTS com PSI.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a. Realizar a análise da abordagem DTS com o objetivo de obter os resultados das componentes de fase correspondentes ao deslocamento superficial do terreno e ao erro da fase topográfica estimada a partir do MDS, processados com as imagens em *multi-look* (filtradas espacialmente e reamostradas) e interferogramas multi referenciados;

- b. Transformar os resultados da DTS para *full resolution* e referenciá-los a uma única imagem mestra, localizada no centro da série temporal, a fim de minimizar as decorrelações temporais, para que sirvam de informações a priori para o processamento PSI;
- c. Realizar o processamento PSI utilizando os resultados da DTS para gerar o mapa final de velocidade de deslocamento de superfície em termos da taxa anual de deformação (mm/ano);
- d. Comparar os perfis de deslocamento, de alguns pontos, obtidos com o processamento das imagens e com os dados de monitoramento coletados por estação total, disponibilizados pela empresa Samarco;
- e. Analisar a compatibilidade dos resultados das técnicas A-DInSAR em relação aos resultados medidos em campo com topografia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípios básicos do imageamento por radar

Radar é um acrônimo para *Radio Detection and Ranging*. Trata-se de um sensor ativo que transmite um sinal de energia eletromagnética em direção ao terreno e registra a resposta do alvo ou superfície. Os radares operam na faixa das micro-ondas do espectro eletromagnético. Para os radares imageadores, geralmente, é considerado como intervalo de operação os comprimentos de onda eletromagnética entre 1mm e 1m, ou, em termos de frequência de 0,3GHz a 300GHz. Os sistemas orbitais mais comuns utilizam ondas eletromagnéticas com comprimentos nos intervalos da banda X (3,1cm), C (5,6cm) e L (23,6cm). As imagens obtidas com esses sensores, diferentemente das obtidas com os sensores ópticos, não são afetadas por cobertura de nuvem ou neblina. Além disso, uma vez que possuem fonte própria de energia, podem operar e coletar dados de dia ou de noite (HENDERSON; LEWIS, 1998; PARADELLA et al., 2012).

Os sistemas dos radares imageadores enviam um sinal em direção ao alvo. Em seguida, o sistema passa a captar os sinais de retorno. Os sinais de retorno são registrados pela unidade receptora do sistema (HENDERSON; LEWIS, 1998). Segundo Raney (1998), o sinal registrado corresponde a energia retroespalhada pelo alvo (ou espalhador) após a interação com a onda eletromagnética enviada pelo sensor. Essa interação é função de características do alvo como rugosidade, ângulo de incidência local, propriedades elétricas, entre outras; e das condições estabelecidas do sistema como frequência, polarização e geometria de iluminação para os sinais emitidos.

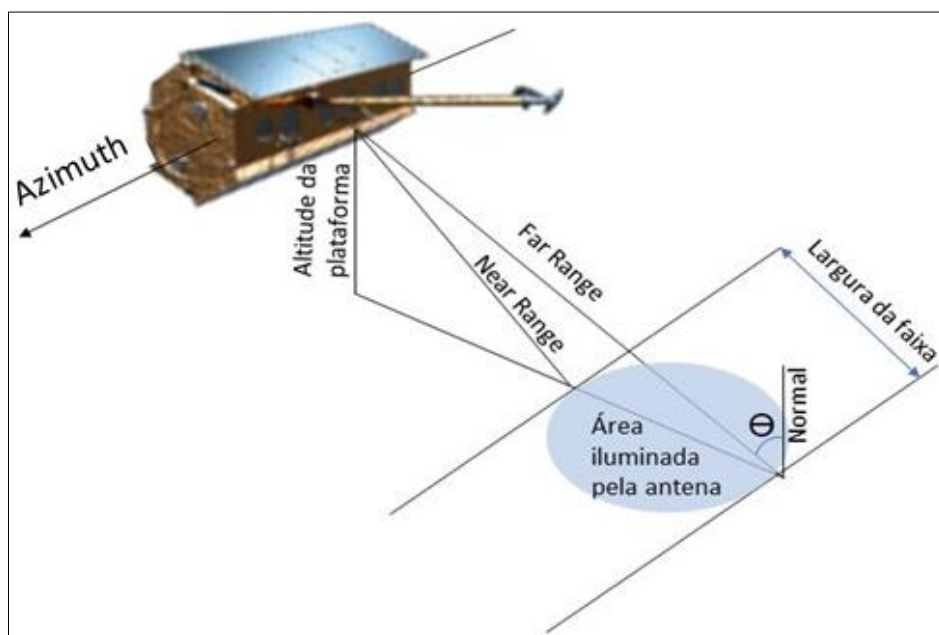
O desenvolvimento do radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*), onde uma antena artificialmente longa pode ser sinteticamente criada através do deslocamento de uma antena pequena, ocorreu para que fosse possível operar com antenas de tamanhos físicos menores e ainda assim obter imagens de boa resolução espacial. Isso foi fundamental para que se

desenvolvessem os sistemas orbitais de imageamento SAR (HENDERSON; LEWIS, 1998).

2.2 Geometria do imageamento SAR

Os sistemas de imageamento SAR apresentam visada lateral. Diferentemente dos sistemas com sensores eletro-ópticos, o imageamento com SAR não pode ser feito na direção do nadir, devido à ambiguidade do sinal de retorno, que impediria a discriminação de dois objetos simetricamente posicionados em relação à antena. A Figura 2.1 apresenta a geometria de imageamento de um sistema SAR.

Figura 2.1 - Geometria do Imageamento SAR.



Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013).

Como ilustrado na Figura 2.1, azimute é a direção de deslocamento da plataforma, *near range* é a distância ao longo da linha de visada do radar (projeção *slant range*) entre o sensor e o alvo mais próximo, enquanto *far range* é a distância entre o sensor e o alvo mais distante imageado na mesma

posição. A distância entre os alvos imageados nesses alcances (*near* e *far range*) é a largura da faixa imageada. O plano *slant range* é inclinado em relação ao plano horizontal no terreno. Sua projeção no solo é denominada de *ground range*. A resolução em *range* (perpendicular a trajetória do satélite) é função da largura de banda do pulso do radar (*chirp*). A habilidade de separar dois objetos próximos na superfície vai depender da resolução do radar (RANEY, 1998).

A área de iluminação da antena está indicada na Figura 2.1 e corresponde à porção do terreno imageada pelo feixe da antena. Já a faixa de imageamento corresponde à largura da porção total do terreno imageado. O ângulo formado entre a normal no ponto imageado e o feixe do sinal do radar é denominado ângulo de incidência e está representado por θ .

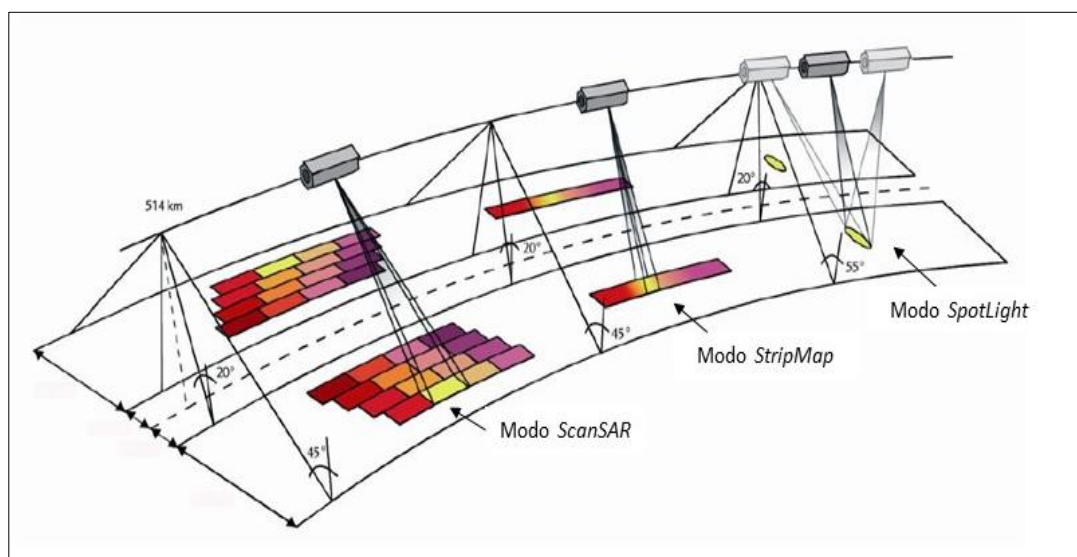
Uma célula de resolução (*pixel*) de uma imagem de radar possui uma dimensão na direção de deslocamento da plataforma (*azimute*), e outra na direção transversal a essa (*range*). Um plano de imagem bidimensional (*range* e *azimute*) é obtido com o sensor em movimento e periodicamente transmitindo pulsos ortogonais à direção da trajetória (PARADELLA et al., 2012).

2.3 Modos de imageamento SAR

Os sistemas SAR podem operar em diferentes modos de imageamento, controlando o padrão de radiação da antena. O modo de operação mais conhecido é o modo *StripMap*, no qual o padrão de radiação da antena é fixado em uma faixa, imageando assim uma única faixa contínua. Para faixas de imageamento mais larga se utiliza o modo ScanSAR, em que o padrão de radiação da antena é sucessivamente direcionado para uma elevação diferente. Cada sub-faixa é iluminada por múltiplos pulsos, mas por um tempo menor do que no caso do modo *Stripmap*. Após o processamento apropriado, isso resulta em uma imagem SAR de faixa mais ampla mas com resolução em *azimute* degradada, quando comparada ao modo *Stripmap*. Quando é

requerida uma melhor resolução em azimute, o modo *Spotlight* é utilizado. Nesse modo, o padrão da antena é direcionado em azimute em direção a um ponto fixo para iluminar uma determinada região (MOREIRA et al., 2013). A Figura 2.2 apresenta os três modos de imageamento descritos.

Figura 2.2 - Modos de Imageamento do satélite TerraSAR.



Fonte: Adaptado de Airbus Space and Defense (2015).

Além desses modos apresentados na Figura 2.2, existem outros como o modo TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*) (ZAN; GUARNIERI, 2006) e o modo *wave*, cada um melhorando o desempenho de certos parâmetros, porém à custa de outros (MOREIRA et al., 2013).

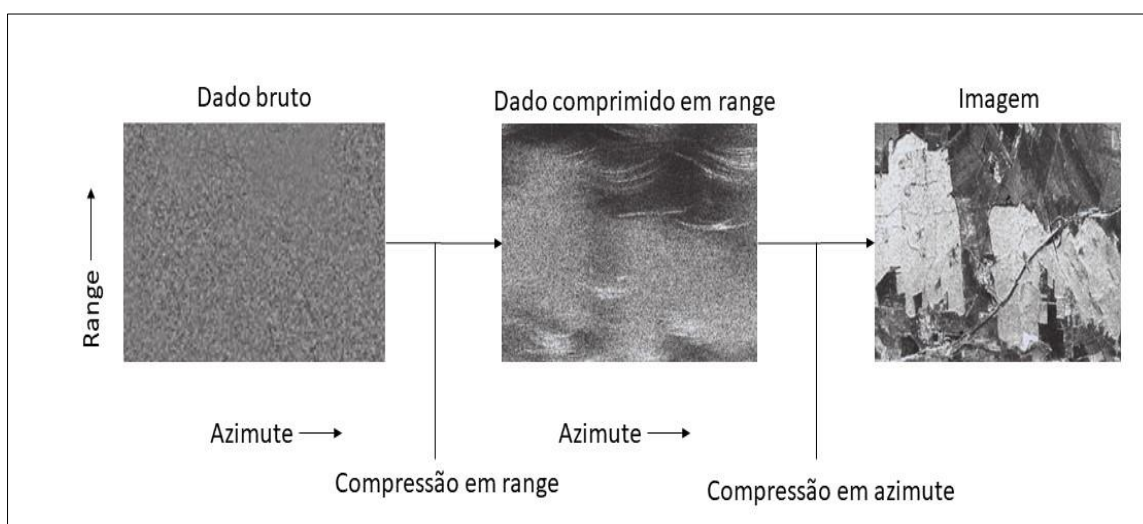
2.4 Imagem SAR

A amplitude, ou intensidade, e a fase do sinal retroespalhado de cada célula de resolução pode ser calculada sob forma de uma imagem de valores complexos. Assim, uma imagem SAR é representada por um arranjo de números digitais

(*pixels*) os quais expressam uma matriz de números complexos definidos pelos valores de fase e amplitude (PARADELLA et al., 2012).

O dado bruto (sinal recebido pelo radar) requer uma considerável quantidade de processamento de sinal para a formação da imagem, processo conhecido por focagem (*focusing*) (BAMLER; HARTL, 1998). De maneira geral, o dado bruto passa por uma compressão, através do processo de convolução do dado com uma função de referência, em range e em azimuth. Essa transformação está resumida na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 2.3 - Compressão do sinal SAR.



Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2013).

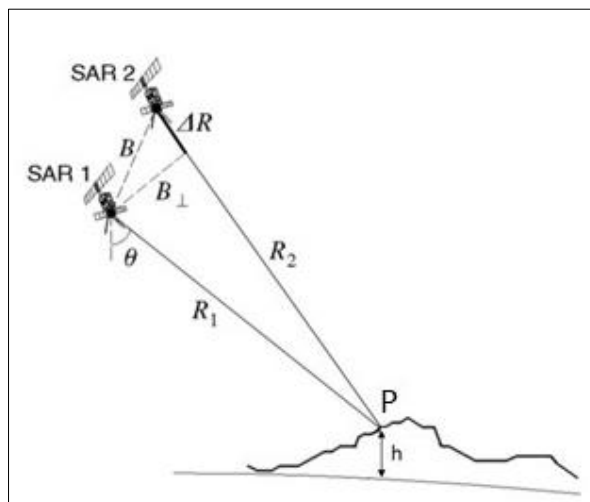
Distorções geométricas nas imagens SAR como encurtamento de rampa (*foreshortening*), superposição (*layover*) e sombreamento (*shadowing*) existem principalmente em regiões de relevo acidentado, causados pela visada lateral do sensor radar. Uma vez que uma imagem de radar é formada na direção de *range*, em geral, quanto mais alto um objeto, mais próximo este está da antena do radar e, portanto, mais rápido seu eco é registrado em relação aos objetos mais baixos, o que causa distorções devido ao relevo na imagem SAR. Além

das distorções geométricas, as imagens de radar apresentam um ruído causado pela natureza coerente de suas ondas. Esse ruído, que causa um efeito granuloso nas imagens, é chamado de *Speckle* e pode ser reduzido através do processamento *Multi-look* no qual a antena é dividida em porções (*looks*), as imagens geradas de cada porção são adicionadas umas às outras formando uma imagem resultante com maior relação sinal-ruído. Esse processamento diminui o efeito granuloso da imagem, o que pode auxiliar na sua interpretação, no entanto, degrada sua resolução espacial (JENSEN, 2007). Outra maneira de reduzir o efeito do ruído speckle é através de filtros apropriados para este tipo de ruído, que é multiplicativo (SANT'ANNA, 1994).

2.5 Interferometria SAR (InSAR)

A interferometria SAR (InSAR) utiliza a informação da fase do sinal de células de resolução homólogas de imagens SAR. Nessa técnica, duas imagens são obtidas de uma mesma área por duas antenas separadas espacialmente ou temporalmente. Essas antenas podem estar na mesma plataforma ou a mesma antena pode adquirir dados duas vezes, em instantes distintos, sobre a mesma área (GABRIEL et al., 1989), como é o caso de sensores radar orbitais. A Figura 2.4 mostra a geometria de aquisição de imagens para interferometria SAR.

Figura 2.4 - Geometria de aquisição de imagens para Interferometria SAR.



Fonte: Adaptado de Paradella et al. (2015a).

Na Figura 2.4, SAR 1 e SAR 2 representam as posições das antenas SAR. B é a linha de base (distância entre SAR 1 e SAR 2) e B_{\perp} a linha de base perpendicular (ou normal). R_1 e R_2 são as distâncias oblíquas das antenas SAR1 e SAR2, respectivamente, ao ponto P de altitude h em uma superfície, ΔR é a diferença entre essas distâncias e θ é ângulo de incidência.

A configuração apresentada na Figura 2.4 pode ser obtida utilizando a interferometria com única passagem (*single-pass interferometry*) ou com duas passagens da plataforma (*repeat-pass interferometry*), seja ela orbital ou aérea. Dada essa geometria, a fase interferométrica, ou diferença de fase, pode ser representada pela Equação 2.1.

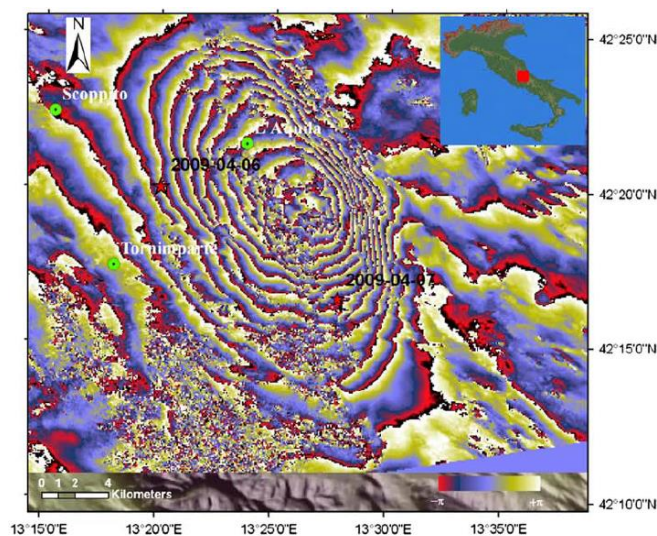
$$\phi_{\Delta t} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1, $\phi_{\Delta t}$ representa a diferença de fase, λ o comprimento de onda e ΔR a diferença das distâncias medidas pela antena SAR1 e SAR2 ao ponto P, como representado na Figura 2.4. A diferença de fase da Equação 2.1 pode também ser calculada segundo a Equação 2.2 (BAMLER; HARTL, 1998).

$$\phi_{\Delta t} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin \theta} h \quad (2.2)$$

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* (Mura, 2000). O interferograma apresenta um ciclo repetitivo da fase de 0 a 2π , caracterizado por padrões denominados franjas (Mura, 2000). A Figura 2.5 apresenta um interferograma ilustrando esses padrões de franja.

Figura 2.5 - Padrões do tipo franja em interferograma.



Fonte: Adaptado de Stramondo et al. (2011).

Para estimar a grandeza desejada pela aplicação da técnica, que pode ser a topografia da superfície, movimentações ou ambas, o interferograma deve passar pelo processamento de desdobramento de fase (*phase unwrapping*) para remover a ambiguidade da fase (CONSTANTINI, 1998). 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 (MASSONNET et al., 1993; MASSONNET; FEIGL, 1998). Como mencionado na seção 1, a InSAR é

muito utilizada para a determinação da topografia de uma superfície e é muito relevante para a geração de MDS's.

2.6 Coerência interferométrica

A coerência interferométrica é o grau de correlação complexo entre duas imagens SAR no formato complexo que formam um par interferométrico. Clima, vegetação e alterações nas propriedades dielétricas dos alvos levam a uma perda de correlação temporal. Sendo assim, a coerência é um parâmetro que caracteriza a qualidade de um interferograma formado por cada par de imagens complexas corrigidas (ZEBKER et al., 1992a). Segundo Zhou et al. (2009), a correlação pode então ser estimada para cada par a partir da Equação 2.3.

$$\rho = \frac{|\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_1(i,j)c_2^*(i,j)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_1(i,j)c_1^*(i,j)} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_2(i,j)c_2^*(i,j)}} \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3, c_1 e c_2 representam o par de imagens complexas; $C(i,j)$ representa o valor complexo do pixel (i,j) , sendo i a direção range e j a direção azimute; $C^*(i,j)$ é o complexo conjugado de $C(i,j)$; N é o número de pixels na direção de range e M é o número de pixels na direção de azimute de uma janela amostral de onde é calculado o coeficiente de correlação (ZHOU et al., 2009). Os valores de coerência (ρ) variam de 0 a 1, sendo 0 para baixa coerência e alta variabilidade e 1 para alta coerência e baixa variabilidade. Para que a técnica InSAR seja efetiva, valores alto de coerência ($>0,7$) entre os *pixels* das imagens que formam o par interferométrico são recomendados, uma vez que acarretam menor erro no MDS (ZEBKER et al., 1992a).

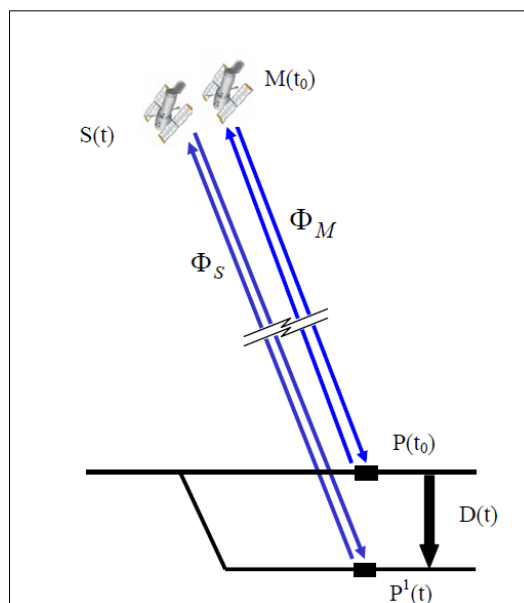
Uma séria limitação da InSAR é a descorrelação, ou perda de coerência interferométrica. A descorrelação temporal ocorre devido a mudanças nas características nos alvos. Por exemplo, dependendo do comprimento de onda de operação do radar, alvos como vegetação causam significante

descorrelação que, frequentemente, impedem a interpretação da fase interferométrica. Linhas de base espacial e temporal longas contribuem para o descorrelacionamento das imagens, causando perda da coerência interferométrica. A baixa coerência resulta em um aumento do ruído de fase, dificultando e até impossibilitando o desdobramento da fase interferométrica (WERNER et al., 2003), que é a etapa fundamental no processamento InSAR.

2.7 Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)

A interferometria diferencial SAR (*Differential SAR Interferometry* – DInSAR) é a técnica derivada da InSAR que, baseada na diferença de fase de pelo menos duas imagens SAR complexas adquiridas em diferentes épocas sobre a mesma área e com geometrias próximas, detecta deslocamentos superficiais na direção da LoS. Esses deslocamentos podem ser causados por deformações ou movimentações na superfície entre as aquisições das imagens. A primeira apresentação de resultados experimentais utilizando a técnica DInSAR para detecção de pequenas mudanças (1cm ou menos) na elevação em grandes áreas (faixas de 50km) foi feita pelos autores Gabriel et al. (1989), que 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. Para aplicações em detecção de deslocamentos na superfície, os sistemas orbitais são os mais utilizados, sendo os sistemas aerotransportados menos significativos. A Figura 2.6 apresenta o esquema do princípio da técnica DInSAR em sua forma simples, isto é, realizada com a análise de apenas um par de imagens SAR.

Figura 2.6 - Princípio da DInSAR.



Fonte: Crosetto et al. (2005).

Uma primeira imagem que apresenta P (um pixel no terreno com coordenadas em azimute e em *range* na imagem) é adquirida no tempo t_0 ($P(t_0)$) com a medição da fase representada por Φ_M . A primeira imagem adquirida é usualmente denominada de imagem mestre (*master* – $M(t_0)$). Admitindo que haja um deslocamento $D(t)$ que transporte P de sua posição inicial no terreno para a posição P^1 , quando a segunda imagem for adquirida no instante t , o valor de fase medido será Φ_S . Essa segunda imagem é normalmente referida como imagem escrava (*slave* – $S(t)$). A diferença de fase entre Φ_S e Φ_M , é denominada de fase interferométrica ($\phi_{\Delta t}$). Admitindo que não haja deslocamento ou deformação ($D(t)$ nulo), isto é, se o terreno estiver estável e P coincidir com P^1 , a fase interferométrica ($\phi_{\Delta t}$) está relacionada à diferença entre as distâncias sensores-alvo nas duas aquisições, o que é o princípio da geração de MDE por interferometria. No entanto, se houver deformação, a fase interferométrica não está relacionada apenas a essa diferença de distâncias mas também a outras componentes, inclusive a movimentação no terreno (ϕ_{dr}) (CROSETTO et al., 2005).

Na DInSAR o objetivo é conhecer o deslocamento da superfície na direção de visada do satélite (Line of Sight – LoS). Para tal, é necessário isolar a componente do deslocamento (ϕ_{dr}) das demais componentes da fase interferométrica apresentadas na Equação 2.4. A componente topográfica pode ser estimada a partir de um MDS disponível, 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 estimativa é feita com a informação das posições das órbitas do satélite e da geometria de aquisição. Realizando a subtração da fase topográfica estimada, a fase interferométrica restante é função da fase devida ao deslocamento do solo (ϕ_{dr}) entre as aquisições, além de outras componentes de fase indesejáveis, representadas pela Equação 2.4.

$$\phi_{\Delta t(i,j)} = \phi_{dr(i,j)} + \phi_h(i,j) + \phi_{atm(i,j)} + \phi_{\beta(i,j)} + \phi_{\eta(i,j)} \quad (2.4)$$

Sendo i e j as coordenadas em azimute e *slant range*, respectivamente, as componentes da Equação 2.4 são:

- a) ϕ_{dr} : componente de fase relacionada ao deslocamento do alvo (*pixel* no terreno) no terreno na direção da LoS, que é altamente correlacionada temporalmente, podendo apresentar diferentes graus de correlação espacial (COLESANTI et al., 2003);
- b) ϕ_h : componente de fase residual devido a erros na estimativa da fase topográfica a partir de um MDE, dada pela diferença entre a verdadeira altitude do centro do *pixel* e a altitude fornecida pelo MDS (PARADELLA et al., 2012). Essa componente é função da linha de base perpendicular (FERRETTI et al., 2000);
- c) ϕ_{atm} : componente relativa à contribuição da atmosfera, a qual introduz efeitos ou artefatos denominados na literatura de APS (*Atmospheric Phase Screen*). É responsável por atrasos no sinal e é, geralmente, descorrelacionada no tempo e correlacionada no espaço (FERRETTI et al., 2000);

d) ϕ_β : é a componente de fase devido a erros de órbita e é causada por imprecisões na determinação das posições do sensor que, embora sejam pequenas, podem afetar a estimativa da fase topográfica. Essa componente é descorrelacionada entre as aquisições mas altamente correlacionada no espaço (KAMPES, 2006);

e) ϕ_η : representa o ruído de fase, que pode ser causado por diversos fatores como ruído térmico do sistema, quantização do sinal, erros no co-registro das imagens, descorrelação temporal, etc. Para derivar informações sobre um fenômeno de deformação é necessário utilizar *pixels* caracterizados por baixo nível de ruído (CROSETTO et al., 2005; PARADELLA et al., 2012).

Uma vantagem da técnica DInSAR é que ela proporciona uma visão abrangente do fenômeno da deformação 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. Esses estudos muitas vezes foram realizados com técnicas avançadas de DInSAR, que serão apresentadas na próxima seção.

A DInSAR apresenta limitações que se dão essencialmente pelas descorrelações temporal e geométrica entre as imagens (diferenças na geometria de aquisição) e heterogeneidades atmosféricas (causados por atrasos de fase no caso orbital). A descorrelação 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 descorrelação geométrica, por sua vez, 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, por sua vez, pode comprometer a acurácia do monitoramento da deformação (MASSONET et al., 1993; MASSONNET; FEIGL, 1998; FERRETTI et al., 2001). Para minimizar essas limitações, foram desenvolvidas técnicas avançadas de DInSAR, com processamentos mais sofisticados e utilização de séries temporais de imagens SAR.

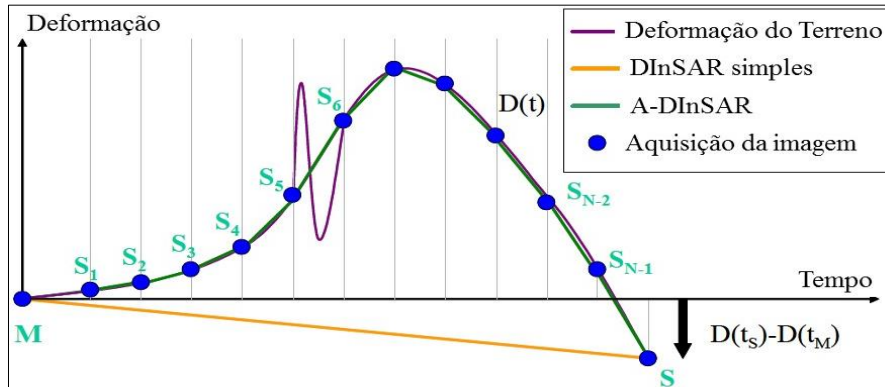
2.8 Interferometria Diferencial Avançada (A-DInSAR)

Uma melhora significativa na qualidade dos resultados de fase de deslocamento é alcançada quando da utilização de um grande número de imagens SAR adquiridas sobre a mesma área ou cena. São as chamadas técnicas avançadas de interferometria diferencial (A-DInSAR), as quais representam um avanço em relação às técnicas simples de DInSAR, tanto em termos de capacidade de modelagem de deslocamento superficial quanto em termos de precisão dos resultados. 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).

A

Figura 2.7 é uma ilustração do que se pode obter em termos de deslocamento temporal em relação ao número de aquisições no intervalo de tempo ilustrado. Com a DInSAR simples, com apenas duas imagens, mestre (M) e escrava (S), é capaz apenas de estimar a deformação integrada ($D(t_S) - D(t_M)$). Já as técnicas de A-DInSAR são capazes de fornecer uma descrição mais completa do fenômeno de deslocamento no intervalo de tempo da análise, dependendo do número de imagens SAR e da distribuição temporal dessas. Como ilustrado na Figura 2.7, a deformação ocorrida no intervalo entre as aquisições S5 e S6 não pode ser totalmente modelada devido à insuficiência de informações nesse intervalo. Além da vantagem da redundância de observações, as técnicas de A-DInSAR permitem que sejam implementados procedimentos de análises e modelagem de dados que, associados a tratamentos estatísticos apropriados das observações, tornam possível a estimativa de diferentes parâmetros que contribuem com a fase interferométrica, como o erro topográfico residual e a contribuição atmosférica (APS) (CROSETTO et al., 2005).

Figura 2.7 - Amostragem do fenômeno com DInSAR simples e A-DInSAR.



Fonte: Adaptado de Crosetto et al. (2005).

Para estimar a fase do deslocamento é necessário analisar um conjunto de *pixels* selecionados segundo um critério, que pode ser a coerência interferométrica, a dispersão de amplitude ou outro, a depender a técnica empregada. O conceito de coerência interferométrica está apresentado na seção X e o de dispersão de amplitude está apresentado na seção 2.8.2.

Para estimar a fase do deslocamento é necessário analisar um conjunto de *pixels* selecionados segundo um critério, que pode ser a coerência interferométrica, a dispersão de amplitude ou outro, a depender a técnica empregada. O conceito de coerência interferométrica está apresentado na seção X e o de dispersão de amplitude está apresentado na seção 2.8.2.

Como mencionado acima, a DInSAR é limitada pela perda de coerência entre as aquisições das imagens e isso resulta em ruídos na fase interferométrica. Durante o processamento é possível estimar para cada interferograma a coerência entre as imagens que os formam. A técnica DInSAR em sua forma simples usa essa informação de coerência para a seleção de pixels para obtenção de informações sobre a deformação, critério que também é utilizado em muitos métodos de A-DInSAR, como o do autor Berardino et al. (2002), que propôs uma metodologia para monitoramento de deformação baseado em linhas de base curtas (Small Baseline Subset – SBAS), que foi utilizado por

Schmidt e Bürgmann (2003) para monitorar falhas geológicas com 115 interferogramas diferenciais, e por Gama et al. (2015) para monitorar minas de ferro a céu aberto no Brasil, dentre outros.

Outra importante classe de A-DInSAR baseia-se na dispersão da amplitude do sinal para a seleção de *pixels* adequados para interferometria, trata-se da interferometria por espalhadores persistentes (*Persistent Scatterers Interferometry* – PSI), que foi apresentada pelos autores Ferretti et al. (2000;2001). Desde a apresentação da PSI, a A-DInSAR recebeu inúmeras outras contribuições, variando em configurações de linha de base, critérios de seleção de pixel e modelos de deformação para se adaptar a aplicação desejada.

Vale lembrar que, atualmente, os softwares para interferometria diferencial não realizam apenas um tipo de método ou abordagem, mas sim 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.

2.8.1 Séries temporais de interferometria diferencial SAR (DInSAR Time Series - DTS)

A técnica de séries temporais de interferometria diferencial SAR (DTS) se baseia na análise de um conjunto de interferogramas diferenciais multi-referenciados (sem uma única imagem de referência), e processados em *multi-look* (filtrados espacialmente e reamostrados) construídos com uma série temporal de imagens SAR de uma mesma cena (USAI, 2002). Desta maneira, os pares de imagens utilizados para gerar as imagens interferométricas (interferogramas) não estão referenciados a uma única imagem, mas sim são definidos pares segundo um limiar de linha de base espacial e temporal.

Essa pilha de interferogramas é gerada a partir de um conjunto de N+1 imagens SAR adquiridas em ordem temporal $(t_0, t_1, t_2, \dots, t_N)$ e cada par

interferométrico diferencial é construído, em um dado intervalo de tempo (Δt), segundo a Equação 2.4. Um conjunto de M interferogramas diferenciais é então estabelecido com base na restrição do intervalo de tempo e do comprimento da linha de base. Considerando um ponto de referência atribuído a uma área estável e um ponto genérico de coordenadas em azimuth e *slant range* (i e j, respectivamente), os valores de fase interferométrica (*multi-look*) deste ponto genérico em relação ao ponto de referência podem ser organizados em um vetor de M elementos como mostra a Equação 2.5.

$$\phi_{ObML(i,j)}^T = [\phi_{\Delta t1(i,j)}, \phi_{\Delta t2(i,j)}, \dots, \phi_{\Delta tM(i,j)}] \quad (2.5)$$

O número dos N valores de fase desconhecidos relacionados ao deslocamento em LoS, de um ponto genérico (i,j), na ordem temporal (t_1, t_2, \dots, t_N), considerando t_0 como a referência temporal (deformação zero), pode ser escrito como o vetor deslocamento representado pela Equação 2.6.

$$\phi_{Disp(i,j)}^T = [\phi_{dr1(i,j)}(t_1), \phi_{dr2(i,j)}(t_2), \dots, \phi_{drN(i,j)}(t_N)] \quad (2.6)$$

A relação entre o deslocamento em LoS (Equação 2.6) e os dados observados (Equação 2.5) pode ser representada como um sistema de M equações de N variáveis desconhecidas, na forma matricial representada pela Equação 2.7.

$$A\phi_{Disp(i,j)} = \phi_{ObML(i,j)} \quad (2.7)$$

Na Equação 2.7, A é uma matriz de operadores de adição, subtração e ausência (+1,-1,0) que definem as operações entre os pares interferométricos. A solução do sistema de Equações 2.7, para a determinação das medidas de deslocamento, pode ser obtida utilizando-se a abordagem dos mínimos-quadrados, Usai (2002), aplicado à Equação 2.8,

$$\phi_{Disp(i,j)} = A^+ \phi_{ObML(i,j)} \quad (2.8)$$

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

A solução da Equação 2.8 se tornará mal condicionada quando houver um número grande de pares interferométricos diferenciais ($M > N$), podendo apresentar várias soluções. Para solucionar esse problema, pode-se aplicar o método SVD (*Single Value Decomposition*) na Equação 2.8 (GOLUB, 1989).

A técnica DTS pode ser utilizada com uma abordagem modificada do método proposto por Berardino et al. (2002) através da introdução de um conjunto de restrições ponderadas na velocidade do deslocamento superficial do terreno para controlar a suavização da solução da série temporal, minimizando assim os efeitos atmosféricos (SCHMIDT; BÜRGMANN, 2003). Os parâmetros de restrição da suavização e os termos relacionados à derivada da fase em relação à altura do terreno (que é proporcional a linha de base normal), para a estimativa do erro topográfico (he) são incorporados a um sistema de equações. A inversão do sistema então é feita utilizando uma extensão do SVD, fornecendo o vetor de velocidade média do deslocamento do solo, segundo a Equação 2.9 (MURA et al., 2016).

$$V_{d(i,j)}^T = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{\phi_{dr1(i,j)}}{(t_1 - t_0)}, \frac{\phi_{dr2(i,j)}}{(t_2 - t_1)}, \dots, \frac{\phi_{drN(i,j)}}{(t_N - t_{N-1})} \right] \quad (2.9)$$

O deslocamento total (deslocamento sofrido entre a primeira e a última aquisição de imagem) de um *pixel* de coordenadas (i,j) é representado pela Equação 2.10, considerando t_0 como época de referência (deformação nula), $dr(t_0) = 0$ e $V_0 = 0$.

$$dr_{(x,r)} = (t_1 - t_0)v_{d1(i,j)} + (t_2 - t_1)v_{d2(i,j)} + \dots + (t_N - t_{N-1})v_{dN(i,j)} \quad (2.10)$$

A fase do deslocamento e a fase do erro topográfico estão representadas pela Equação 2.11 e 2.12, respectivamente, como resultado de saída da análise DTS.

$$\phi_{Disp(i,j)} = \frac{4\pi}{\lambda} dr_{(i,j)} \quad (2.11)$$

$$\phi_{Topo(i,j)} = \frac{4\pi}{\lambda} he \quad (2.12)$$

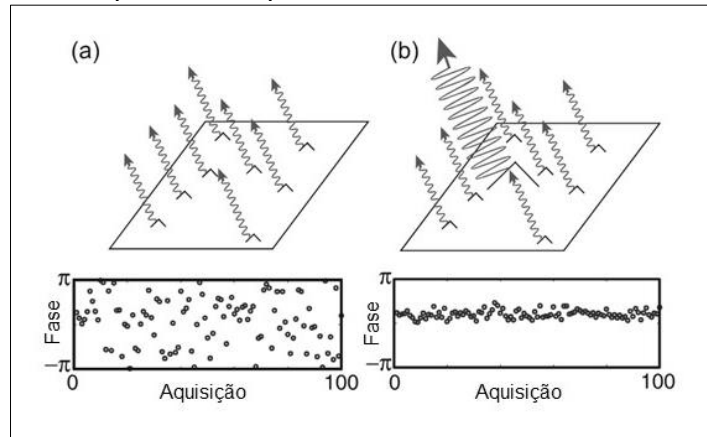
É importante ressaltar que esse *pixel* genérico de coordenadas (i, j) é caracterizado por baixo nível de ruído. Na técnica DTS, *pixels* com essa característica são selecionados segundo o critério da coerência interferométrica (Seção 2.6).

A DTS é capaz de fornecer mapas de deformação em grandes áreas, desde que sejam de alta coerência interferométrica, podendo assim mostrar uma visão sinóptica do fenômeno estudado. No entanto, essa técnica utiliza dados reamostrados, isto é, processados em *multi-look*, o que degrada a resolução espacial.

2.8.2 Interferometria por espalhadores persistentes (*Persistent Scatterers Interferometry – PSI*)

O desenvolvimento dessa classe de A-DInSAR se deve às limitações em termos de coerência e efeitos atmosféricos presentes nas técnicas DInSAR simples e DTS. A interferometria por espalhadores persistentes (PSI) é a técnica baseada na análise de uma pilha de imagens corrigidas SAR de onde são escolhidos pontos que apresentem amplitudes estáveis ao longo do tempo, ou seja, alvos cujas propriedades pouco variam com o tempo e com a geometria de aquisição das imagens. Esses alvos são chamados de espalhadores persistentes (*Persistent Scatterers - PS*) e costumam ser abundantes em regiões urbanas, afloramentos rochosos, postes, pontes, entre outras feições. Em regiões com muita vegetação, florestas e superfícies lisas estes PS's costumam ser ausentes. Nesta técnica, a informação que interessa é a variação de fase de cada ponto (PS) ao longo do tempo, causada por algum tipo de deslocamento superficial (FERRETTI et al., 2000). A Figura 2.8 apresenta o comportamento da fase em um pixel com espalhador distribuído (a) e em um pixel com espalhador persistente (b) em uma célula de resolução.

Figura 2.8 - Espalhadores persistentes em uma célula de resolução.



Fonte: Adaptado de Hooper et al. (2007)

Como mostra o gráfico ilustrativo na parte inferior da Figura 2.8, os valores da fase de um espalhador persistente são constantes ao longo de todas as aquisições ou da série temporal. A escolha dos PS é feita segundo o índice de dispersão das amplitudes (D_A) (Equação 2.13) (FERRETTI et al., 2001).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (2.13)$$

Na Equação 2.13, σ_A e μ_A são, respectivamente, o desvio-padrão e a média da amplitude em um mesmo *pixel* ao longo da série temporal. *Pixels* com índice de dispersão D_A inferiores a 0,25 são selecionados como candidatos iniciais a PS.

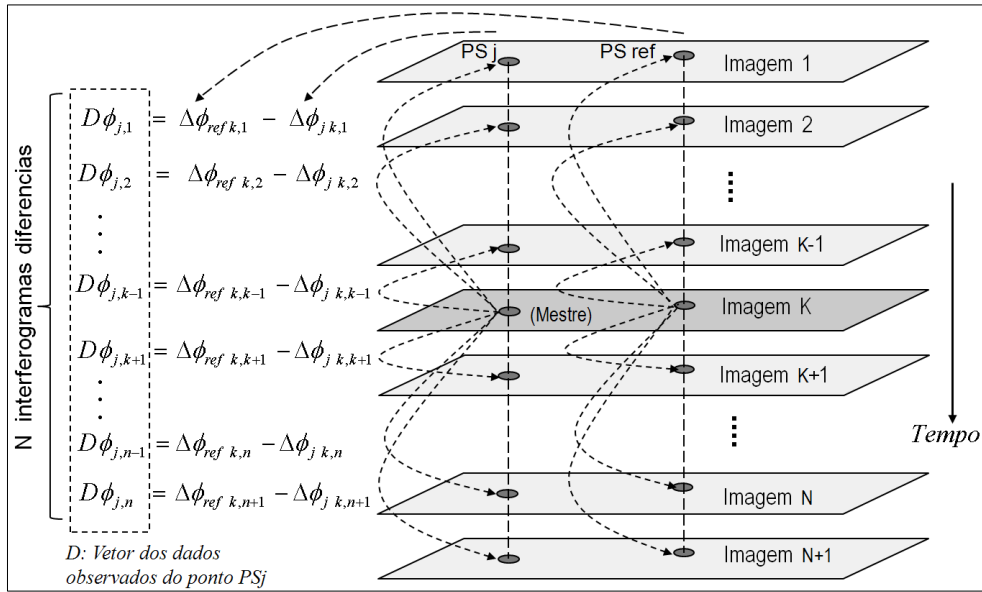
A apresentação da abordagem PSI para determinação de deslocamentos na linha de visada do satélite (LoS), do erro residual do MDS e remoção da fase atmosférica foi feita pelos autores Ferretti et al. (2000; 2001). Na publicação do ano de 2000, com o título de espalhadores permanentes em interferometria (*Permanent Scatterers in SAR Interferometry*), os autores apresentaram um procedimento completo para a identificação e exploração de refletores naturais estáveis, ou espalhadores permanentes, escolhidos segundo um índice de dispersão de amplitude do sinal ao longo do tempo para modelagem linear da deformação. Para tal, utilizaram uma longa série temporal de imagens SAR interferométricas advindas dos satélites ERS (*European Remote Sensing*) da

Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* – ESA). Essa técnica foi precedida pelo patenteamento do algoritmo desenvolvido pela Escola Politécnica de Milão denominado PSInSAR™, em 1999.

Esta técnica é utilizada com maior eficiência a partir de um conjunto mínimo de 15 imagens SAR corregistradas, tornando-se possível a atenuação dos erros de fase relacionados à atmosfera e ruídos (FERRETTI et al., 2000). A série temporal utilizada na análise PSI é baseada em uma pilha de N interferogramas diferenciais, gerados a partir de um conjunto de N+1 imagens SAR, em relação a imagem mestre, como ilustrado na Figura 2.9. Cada interferograma, considerado agora em *full resolution*, isto é, sem reamostragem, pode ser representado como mostra a Equação 2.2 onde as coordenadas (i,j) estão relacionadas a uma posição de um PS genérica. A ideia do PSI é analisar as características espaciais e temporais da fase interferométrica dos pontos alvos individuais (MURA et al., 2016).

A Figura 2.9 apresenta a configuração da definição dos pares interferométricos para a análise PSI e as componentes de fase diferencial de um espalhador persistente. Inicialmente, as N+1 imagens da pilha são corregistradas. Em seguida é selecionada uma imagem mestre posicionada, em geral, no centro da série temporal de imagens a fim de minimizar as decorrelações. Na Figura 2.9, PSref é um ponto de referência estável e PSj é um ponto genérico.

Figura 2.9 - Pares interferométricos PSI e componentes de fase de um espalhador persistente.



Fonte: Paradella et al. (2015a)

Considerando o ponto de referência (PSref) localizado em uma área estável e o ponto genérico (PSj) selecionado de coordenadas (i,j) , os valores de fase (cíclica, ou seja, variando de 0 a 2π) observados para esse ponto em relação ao ponto de referência podem ser organizados em um vetor de N elementos como mostra a Equação 2.14 (FERRETTI et al., 2001; WERNER et al., 2003).

$$D\phi_{Obj(i,j)} = [D\phi_{j,1}, D\phi_{j,2}, D\phi_{j,3} \dots D\phi_{j,1n-1}, D\phi_{j,n}] \quad (2.14)$$

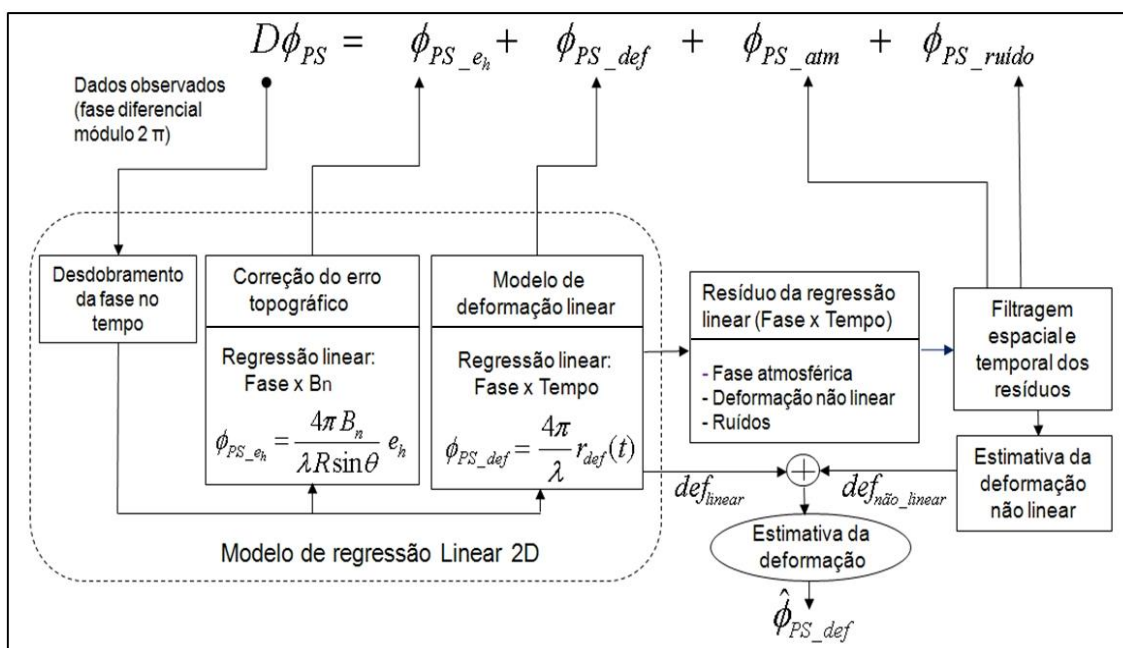
onde cada componente do vetor de fase diferencial observada do ponto PSj, na coordenada (i,j) , é dados por:

$$D\phi_{PSj(i,j)} = \phi_{PSj_def} + \phi_{PSj_eh} + \phi_{PSj_atm} + \phi_{PSj_ruído} \quad (2.15)$$

O valor da fase diferencial representado pela Equação 2.15 é composto das componentes de deformação, erro topográfico, artefatos atmosféricos e ruído. Como mencionado na Seção 2.8, desde sua criação da PSI, houve muitos trabalhos realizados com essa técnica, o que permitiu o desenvolvimento de

diversas metodologias e algoritmos. Uma delas foi a introduzida por Werner et al. (2003) denominado IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*) com implementação no software *Gamma* da empresa *Gamma Remote Sensing*, representado esquematicamente na Figura 2.11.

Figura 2.10 - Ilustração a modelagem de processamento da metodologia IPTA.



Fonte: Paradella et al. (2015a)

A metodologia IPTA explora características das componentes da fase interferométrica com o intuito de separá-las ou minimizá-las para assim estimar a deformação de cada espalhador persistente (PS). Essa técnica é, em essência, baseada em uma regressão linear bidimensional, onde o modelo de fase explora a dependência linear da fase topográfica com as componentes da linha de base perpendicular e a dependência linear do tempo com a deformação (equivalente a uma taxa de deformação constante). Um importante aspecto do IPTA é a possibilidade de uma interação passo-a-passo para melhorar os diferentes parâmetros. Os resíduos da regressão linear da deformação contêm as componentes de fase atmosférica, a deformação não-

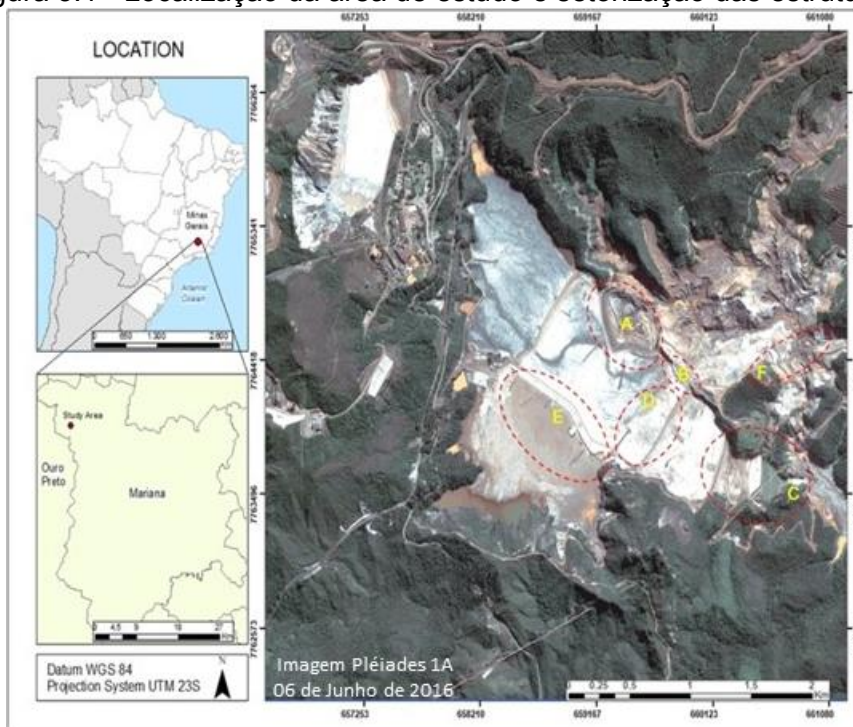
linear e o ruído da fase. Esses resíduos são filtrados no tempo e no espaço para remover as componentes da fase da atmosfera e do ruído, assim como recuperar a componente da deformação não linear (MURA et al., 2016).

A técnica PSI é vantajosa em relação a DTS pois não utiliza *pixels* reamostrados, trabalhando em *full resolution* e assim se beneficiando de uma melhor resolução espacial. Embora essa técnica seja, de maneira geral, melhor e mais sofisticada que a DTS, ela sofre sérias limitações na capacidade de medir fenômenos de deformação rápidos devido à natureza ambígua de suas observações, isto é, da fase interferométrica dobrada (*wrapped*). Essa limitação atrapalha na determinação de fenômenos de deformação rápidos (com taxa alta) e não lineares. O limite máximo de detecção de deformação com essa técnica corresponde a 1/2 do comprimento de onda do SAR em um intervalo de revisita.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, a qual possui uma área de aproximadamente 7.200Km² e está localizada na parte central do estado de Minas Gerais, no centro sul do Cráton do São Francisco, porção antiga da crosta parcialmente coberta por sequências, paleo e mesoproterozóicas (DORR, 1969; MARSHAK; ALKMIM, 1989). Sua denominação deve-se à forma quadrangular da região, delimitada por montanhas com distribuição das rochas metassedimentares (VARAJÃO et al., 2009; ALMEIDA, 1977). A produção de ferro dessa Província corresponde a 68% do total da produção nacional, sendo esta região a maior produtora de minério de ferro no país. A área de estudo abrange o complexo minerário de Germano, localizada no município de Mariana-MG. O resíduo proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro é depositado em barragens de rejeitos, tais como a do complexo de Germano. A Figura 3.1 apresenta a setorização das estruturas da barragem.

Figura 3.1 - Localização da área de estudo e setorização das estruturas.

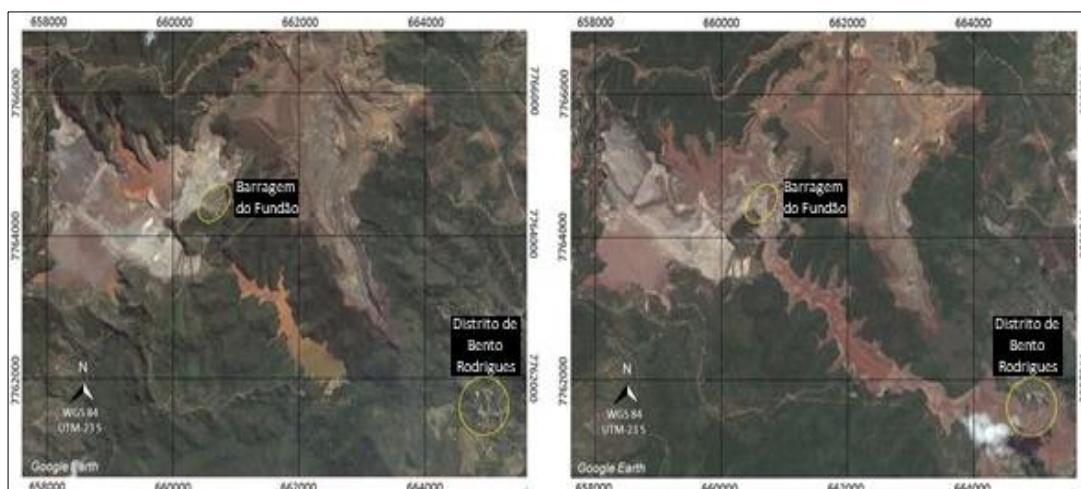


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.1 estão apresentadas as seguintes estruturas: Dique de Sela e Tulipa (A), Dique de Selinha (B), Barragem Principal (C), acesso para veículos (D), Barragem Baía 3 (E) e Barragem do Fundão (F). As estruturas A, B e C foram construídas em rejeito compactado, enquanto a estrutura E é destinada a receber os rejeitos finos (lamas) provenientes do processo de beneficiamento do minério de ferro.

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 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão contendo 55 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro, dos quais 32,6 milhões de m³ foram lançados no meio ambiente. Inicialmente, esses rejeitos atingiram a barragem de Santarém logo a jusante, causando seu galgamento e forçando a passagem de uma onda de lama por 55km no rio Gualaxo do Norte, até desaguar no rio do Carmo. Neste, os rejeitos percorreram outros 22 km até seu encontro com o rio Doce. Através do curso deste, foram carreados até a foz no Oceano Atlântico, chegando no município de Linhares, no estado do Espírito Santo, em 21 de novembro de 2015, totalizando 663,2km de corpos hídricos diretamente impactados. Por todo o trajeto comprovaram-se mortes de trabalhadores da empresa e moradores das comunidades afetadas, desalojamento de populações, destruição de áreas de preservação permanente e vegetação nativa de Mata Atlântica, mortandade de biodiversidade aquática e fauna terrestre, perda e fragmentação de habitats, sensação de perigo e desamparo na população, entre outros (IBAMA, 2015). A Figura 3.2 apresenta o subdistrito de Bento Rodrigues, localizado aproximadamente 5km vale abaixo da barragem do Fundão, antes e após o acidente.

Figura 3.2 - Distrito de Bento Rodrigues antes (20 de julho de 2015) e depois do acidente (9 de novembro de 2015).



Fonte: Produção do autor.

Como é possível ver na Figura 3.2, o subdistrito de Bento Rodrigues foi 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.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Conjunto de dados

Nesta seção será descrito o conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do trabalho e análise dos resultados.

4.1.1 Imagens TerraSAR-X

Para o desenvolvimento do trabalho, com aplicação das técnicas DTS e PSI integradas, foi utilizado um conjunto de 30 imagens do satélite TerraSAR-X com as configurações apresentadas na Tabela 4.1. Na Figura 4.1 está apresentada a área de abrangência da cena.

Tabela 4.1 - Configuração das imagens TerraSAR-X.

| | |
|---|----------------------------------|
| Banda | X |
| Comprimento de Onda | 3,1cm |
| Polarização | HH |
| Modo | <i>StripMap</i> |
| Espaçamento do <i>pixel</i> em azimute | 1,91 |
| Espaçamento do <i>pixel</i> em <i>slant range</i> | 0,91 |
| Formato | <i>Single Look Complex</i> (SLC) |
| Período de revisita | 11 dias |
| Órbita | Ascendente |
| Ângulo de incidência médio | 35° |
| Faixa de imageamento | 30x60Km |

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.1 - Área de abrangência da cena TerraSAR-X.



Fonte: Produção do autor.

As imagens TerraSAR-X foram adquiridas entre 11 de novembro de 2015 (pós rompimento) e 10 de outubro de 2016, com um intervalo de aquisição de 11 dias. Houve perda de duas aquisições entre 14 de abril e 17 de maio de 2016. A Tabela 4.2 mostra as datas das aquisições das imagens.

Tabela 4.2 - Datas de aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas no processamento.

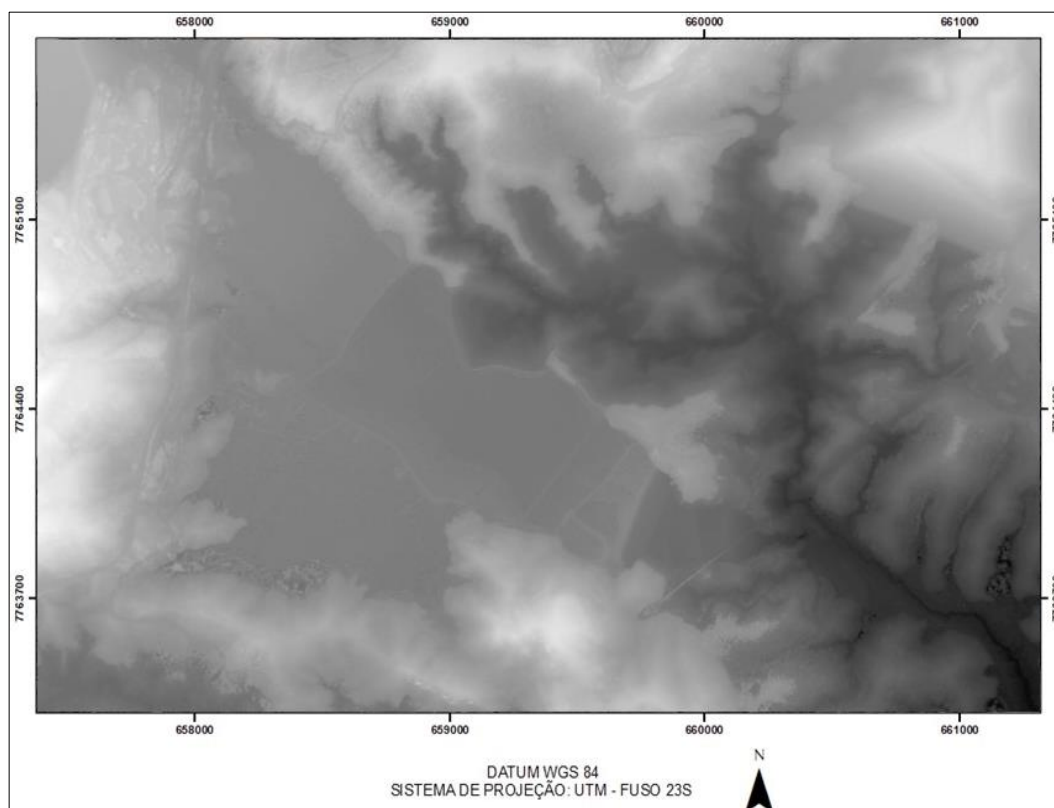
| Aquisição | Data | Aquisição | Data |
|-----------|------------|-----------|------------|
| 1 | 11/11/2015 | 16 | 17/05/2016 |
| 2 | 23/11/2015 | 17 | 28/05/2016 |
| 3 | 04/12/2015 | 18 | 08/06/2016 |
| 4 | 15/12/2015 | 19 | 19/06/2016 |
| 5 | 26/12/2015 | 20 | 30/06/2016 |
| 6 | 06/01/2016 | 21 | 11/07/2016 |
| 7 | 17/01/2016 | 22 | 22/07/2016 |
| 8 | 28/01/2016 | 23 | 02/08/2016 |
| 9 | 08/02/2016 | 24 | 13/08/2016 |
| 10 | 19/02/2016 | 25 | 24/08/2016 |
| 11 | 01/03/2016 | 26 | 04/09/2016 |
| 12 | 12/03/2016 | 27 | 15/09/2016 |
| 13 | 23/03/2016 | 28 | 26/09/2016 |
| 14 | 03/04/2016 | 29 | 07/10/2016 |
| 15 | 14/04/2016 | 30 | 18/10/2016 |

Fonte: Produção do autor.

4.1.2 Modelo Digital de Superfície (MDS)

Como mencionado na seção 2.7, a componente da fase da topografia pode ser estimada a partir de um MDS disponível, provido pela empresa VISIONA TECNOLOGIA ESPACIAL S.A. O MDS foi gerado com 1m de resolução espacial, a partir de tríplete de imagens estereoscópicas Pléiades 1A de 0,5m de resolução espacial (Figura 4.2). As imagens Pléiades 1A foram adquiridas em 19 de junho de 2016.

Figura 4.2 - MDS utilizado para estimativa da fase topográfica.

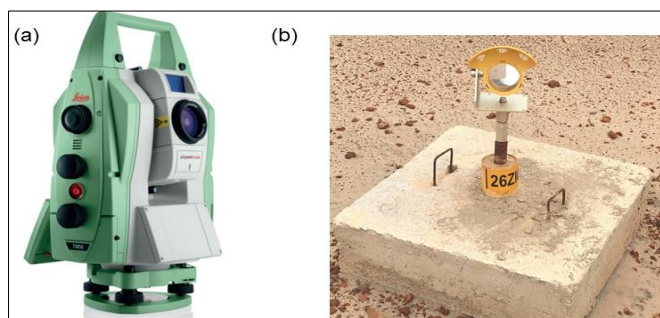


Fonte: Produção do autor.

4.1.3 Dados de levantamentos de campo

Para comparar os resultados de detecção obtidos com o processamento das imagens TerraSAR-X, foram utilizados dados medidos em campo através de levantamentos planialtimétricos de topografia. O levantamento foi feito pela empresa SAMARCO MINERAÇÃO – S.A. Para tal, foi utilizada uma estação robótica modelo Leica TM50, Figura 4.3 (a), de 0,5” (meio segundo), cuja precisão nominal, segundo fabricante, é de 0,6mm + 1,0ppm. Os prismas utilizados para monitoramento são do modelo GPR 112, de 2” (dois segundos) de precisão, apresentados na Figura 4.3 (b). Todo o processo de medição foi automatizado e a estação foi fixada a uma base de centragem forçada.

Figura 4.3 - Estação total (a) e prisma (b) utilizados no levantamento de campo.



Fonte: Produção do autor.

4.2 Softwares utilizados

O processamento interferométrico das técnicas DTS e da PSI foram realizados com o software *Gamma*, da empresa *Gamma Remote Sensing AG*. Esse software é dividido em quatro principais módulos, dos quais, dois foram utilizados:

- *Interferometry, Differential Interferometry and Geocoding (ISP/DIFF&GEO)*;
- *Interferometric Point Target Analysis (IPTA)*;

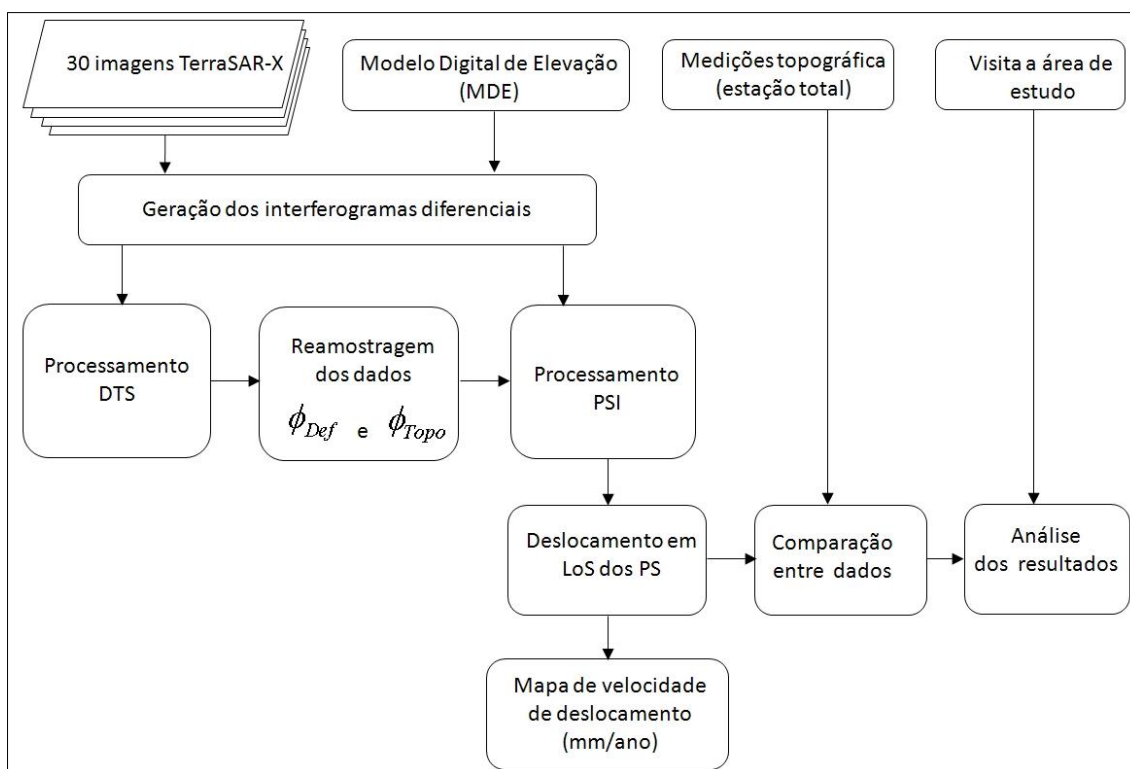
Foi utilizado o módulo ISP/DIFF&GEO para o processamento da DTS e o módulo IPTA para o processamento da PSI.

4.3 Métodos

A integração de técnicas DTS e PSI se beneficia das vantagens de cada uma delas. Da primeira, se beneficia da capacidade de detectar movimentos rápidos e não-lineares em áreas extensas e a da segunda se beneficia da possibilidade de se trabalhar com dados em *full resolution* e assim obter melhor acurácia nas medidas de deformações. Com o processamento PSI foi gerado o mapa de velocidade de deslocamento em LoS em mm/ano. Além disso, comparou-se os dados de deformação, de um período compreendido na série temporal, de

alguns PS com medições feitas em campo com topografia. A fim de compreender as causas dos deslocamentos detectados e conhecer a área de estudo, foi realizada uma visita de campo. A metodologia adotada no trabalho foi proposta pelos autores Mura et al. (2016), como mencionado na seção 1. Essa metodologia baseia-se na utilização dos resultados de fase do deslocamento e de fase do erro topográfico, obtidos com o processamento DTS, como dados de entrada no processamento PSI, como ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Fluxograma geral do trabalho.



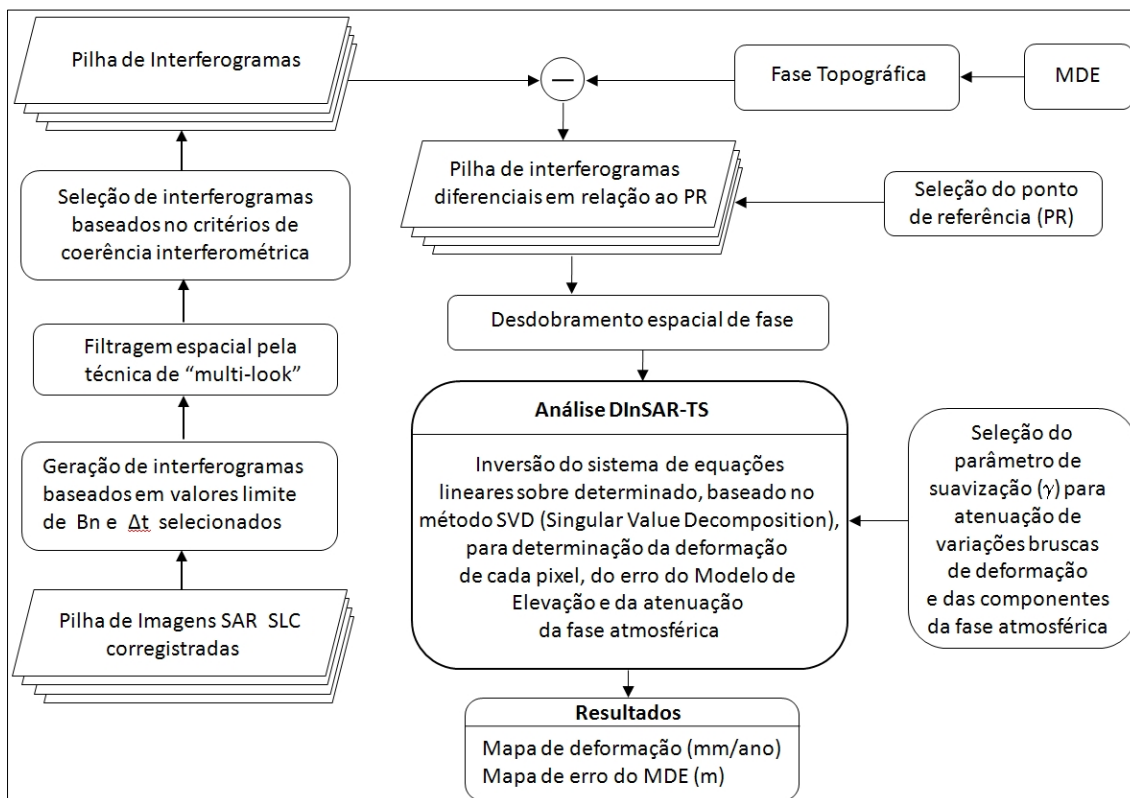
Fonte: Produção do autor.

4.3.1 Processamento DTS

Como mencionado anteriormente, a DTS é uma variação do conceito proposto por Berardino et al. (2002) de linhas de bases curtas. Uma diferença no processamento se dá no fato de um fator de suavização ser utilizado para

minimizar variações bruscas que não são condizentes com o fenômeno de deformação ocorrido no local. A Figura 4.5 apresenta o fluxograma do processamento com a técnica DTS.

Figura 4.5 - Fluxograma do processamento DTS.



Fonte: Paradella et al. (2015a).

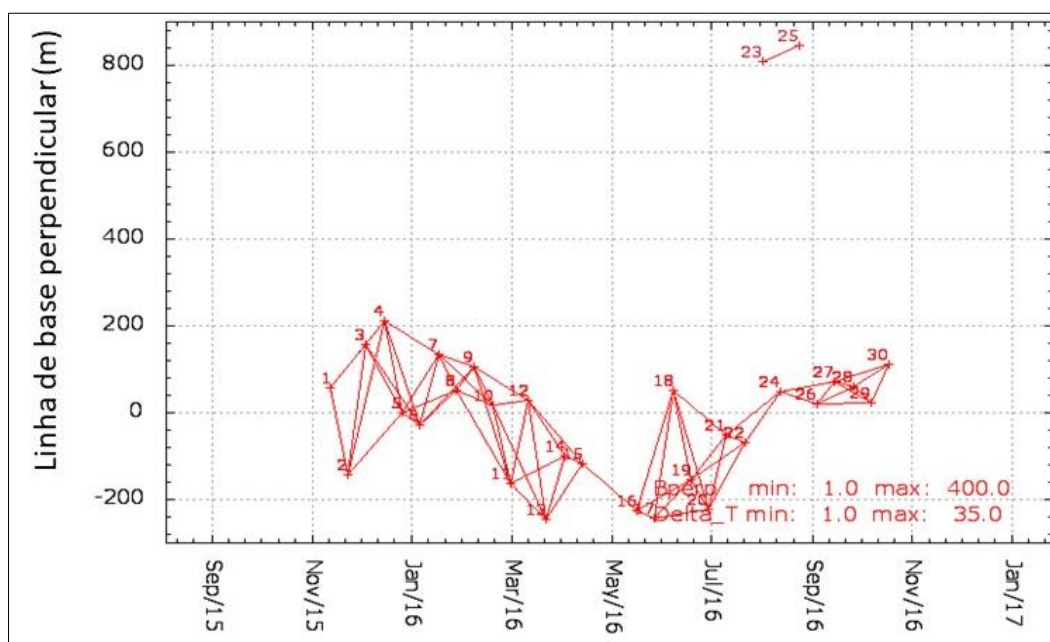
Inicialmente, as 30 imagens TerraSAR-X foram recortadas, para poder se trabalhar com a área de interesse, e corrigidas. O correção é uma etapa de fundamental importância no processamento de qualquer abordagem DInSAR, uma vez que é calculada a diferença de fase entre *pixels* homólogos, esses *pixels* devem corresponder ao mesmo alvo ou ponto no terreno.

Em seguida, foi feita uma filtragem espacial de média com janela de 2x2 (*multi-look*), resultando em *pixels* de dimensão de 3,8x1,8m (azimute e *slant range*),

reduzindo pela metade o número de linhas e colunas das imagens já recortadas e corrigidas. A geocodificação das imagens SAR foi feita com a utilização do MDS, entre outros parâmetros.

Foram então selecionados os pares interferométricos (Figura 4.6) com base em restrição espacial de 400m e temporal de 35 dias, resultando em 74 interferogramas. Chegou-se a estes limiares empiricamente, de forma que não compromettesse a coerência interferométrica. Os 74 interferogramas passaram por filtragem adaptativa espectral com janela de 32x32 para gerar imagens de coerência interferométrica (GOLDSTEIN et al., 1998). *Pixels* dos interferogramas com valor de coerência menor que 0,45 não foram aceitos na análise. Adotou-se esse valor para se ter uma quantidade razoável de pixels na área de interesse do monitoramento. Os *pixels* localizados em áreas vegetadas no entorno do complexo minerário, em especial, apresentaram valor de coerência inferior ao estipulado.

Figura 4.6 - Pares interferométricos utilizados na análise DTS e linhas de base.



Fonte: Produção do autor.

A partir do MDS foi estimada a fase topográfica. Foi selecionado um ponto de referência localizado em área estável e então procedeu-se com o

processamento de desdobramento de fase (*phase unwrapping*) utilizando o algoritmo MCF (*Minimum Cost Flow*) (CONSTANTINI, 1998).

A inversão do sistema de equações (apresentado na seção 2.8.1) foi realizada com uma extensão do método SVD (*Single Value Decomposition*) (GOLUB, 1989), no qual foi introduzido um conjunto de restrições ponderadas na aceleração do deslocamento para suavizar a solução de série temporal e minimizar o efeito da atmosfera (SCHMIDT; BÜRGMANN, 2003). O parâmetro de restrição para suavização (γ) utilizado foi de 1,6 (MURA et al. 2016). O processamento fornece a fase do deslocamento e do erro do MDS, como apresentado nas Equações 2.11 e 2.12, na seção 2.8.1, e o deslocamento acumulado (Equação 2.10). Com esse segundo resultado, foi gerado o mapa de velocidade de deslocamento da superfície.

4.3.2 Técnica Integrada DTS e PSI

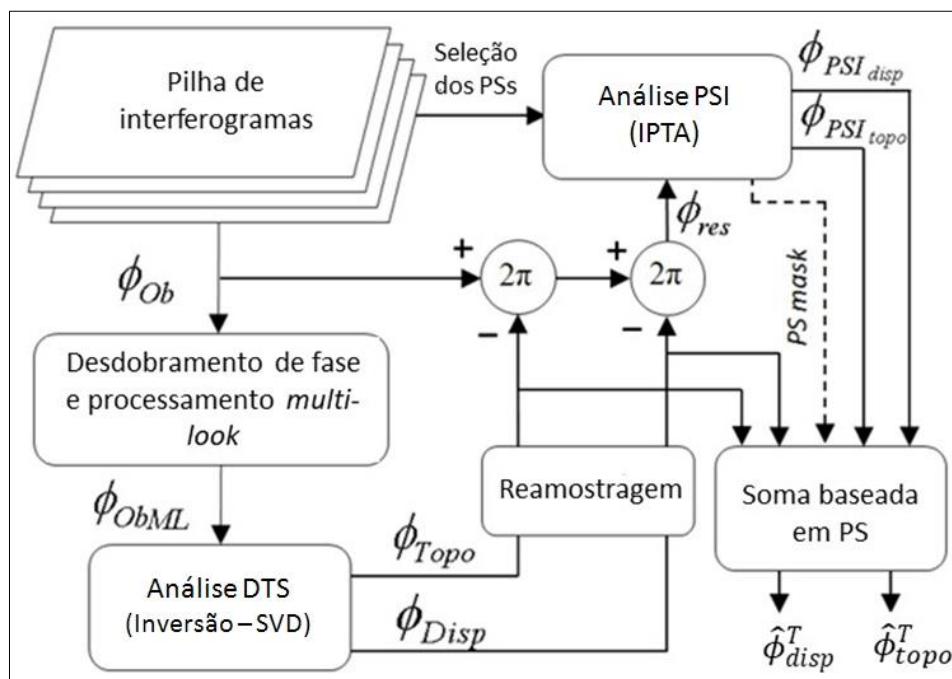
A fase do deslocamento ($\phi_{Disp(i,j)}$) e do erro do MDS ($\phi_{Topo(i,j)}$) obtidos com a técnica DTS, representados pelas Equações 2.11 e 2.12, foram reamostrados para *full resolution*, com método de interpolação bilinear, a fim de serem compatibilizados com a dimensão dos *pixels* na técnica PSI. Como mencionado na sessão 2.8.2, na PSI são selecionados os candidatos a PS segundo o critério de dispersão da amplitude, utilizando como limiar o valor de 0,25. Foi necessário então selecionar os resultados de $\phi_{Disp(i,j)}$ e $\phi_{Topo(i,j)}$ nas posições dos PS selecionados, criando assim ϕ_{PSdisp} e $\phi_{PS topo}$.

Como os interferogramas na PSI são referenciados a uma imagem mestre, enquanto na DTS é utilizado um conjunto de interferogramas multi-referenciados, foi necessário então transformar a fase do deslocamento da DTS para o modelo da PSI, como mostra a Equação 4.1.

$$\phi_{Ph_{Model}}^T = [\phi_{Disp}(t_1) - \phi_{Disp}(t_{Master}), \phi_{Disp}(t_2) - \phi_{Disp}(t_{Master}), \dots, \phi_{Disp}(t_N) - \phi_{Disp}(t_{Master})] \quad (4.1)$$

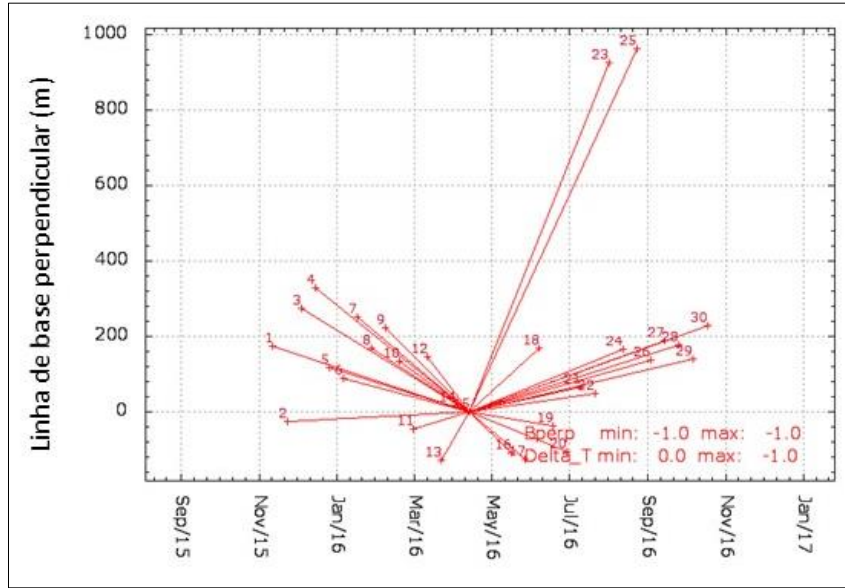
A Figura 4.7 apresenta o fluxograma do processamento integrado das técnicas DTS e PSI. Para o processamento com a PSI foi realizado o corregristo das 30 imagens TerraSAR-X. Em seguida, foi escolhida a imagem adquirida no dia 14 de abril de 2016, sendo essa a 15ª imagem adquirida. Os interferogramas foram então calculados, *em full resolution*, utilizando pares referenciados a essa imagem, como mostra a Figura 4.8.

Figura 4.7 - Fluxograma do processamento integrado DTS-PSI.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.8 - Pares interferométricos utilizados na análise PSI e linhas de base.



Fonte: Produção do autor.

Os candidatos a PS foram estimados com base no índice de dispersão das amplitudes (Equação 2.13). Como mencionado na seção 2.8.2, os valores de fase dobrados (*wrapped*) observados de um PS genérico de coordenadas (i,j) em relação a um ponto de referência estável podem ser organizados no vetor $\phi_{Ob(i,j)}^T$ de N elementos (Equação 2.14). Esse vetor apresenta as componentes de deformação, erro topográfico, fase atmosférica, erros de órbita e ruído. Do vetor $\phi_{Ob(i,j)}^T$ foram então subtraídos (modulo 2π) o erro topográfico ϕ_{PStopo} e o modelo da fase da deformação $\phi_{PhModel}$, visando a redução dos efeitos dessas componentes de fase para melhorar a performance da análise PSI. Primeiro foi subtraída ϕ_{PStopo} , resultando na primeira fase residual dobrada $\phi_{res1(i,j)}^T$ (Equação 4.2), da qual foi então subtraída $\phi_{Phmodel}$, resultando na segunda fase residual dobrada $\phi_{res2(i,j)}^T$ (Equação 4.3).

$$\phi_{res1(i,j)}^T = \phi_{Ob(i,j)}^T - \phi_{PStopo(i,j)}^T \quad (4.2)$$

$$\phi_{res2(i,j)}^T = \phi_{res1(i,j)}^T - \phi_{PhModel(i,j)}^T \quad (4.3)$$

A fase resultante da Equação 4.3 apresenta a componente de fase atmosférica, o ruído e a fase residual devido aos erros que ocorreram durante o processamento DTS e erros relacionados ao modelo de fase $\phi_{PhModel}$ (Equação 4.1), o qual contem componentes de deformação linear e não-linear. Considerando que as maiores componentes (erro topográfico e taxas altas e não-lineares de deformação) foram removidas nas Equações 4.2 e 4.3, o processamento PSI pode ser melhor executado para remover a fase atmosférica restante e o ruído, determinando então a deformação residual com mais precisão.

Procedeu-se então com a análise PSI utilizando o IPTA, que é baseada em uma regressão linear bi-dimensional na qual o modelo de fase explora a dependência linear da fase topográfica com a linha de base perpendicular, para estimativa do erro topográfico; e a dependência da linha de base temporal com a deformação. O desvio-padrão da fase da regressão linear relacionada ao deslocamento *versus* tempo é utilizado como medida de qualidade, permitindo detectar ou rejeitar PS's que não sejam adequados para a análise, isto é, PS's com resíduos da regressão linear com valores superiores ao limiar adotado são eliminados. Foi adotado no trabalho o valor de 1,2 radianos de desvio-padrão, o qual foi adotado empiricamente por Mura et al. (2016), com o qual foi criado uma máscara (*PS mask*), rejeitando para a análise PSI pontos com desvio-padrão da fase superior a esse valor. Atrasos da fase atmosférica podem contribuir para a maioria dos resíduos da regressão linear relacionados a deformação, tendo seus componentes sido fortemente atenuados por um filtro espacial de 500x500 amostras e um filtro temporal de 5 amostras, considerando suas características de serem espacialmente correlacionadas e temporalmente descorrelacionadas.

Os resultados da análise PSI foram: fase do deslocamento e fase do erro topográfico dos PSs, $\phi_{PSI\,disp}^T$ e $\phi_{PSI\,topo}^T$. Esses resultados foram adicionados ao modelo de fase do deslocamento e à fase do erro topográfico, resultantes

da DTS e na posição dos PSs, $\phi_{PhModel}^T$ e ϕ_{PStopo}^T , respectivamente, resultando na solução final da deformação e do erro topográfico, como mostram as Equações 4.4 e 4.5.

$$\hat{\phi}_{disp(i,j)}^T = \phi_{PSIdisp(i,j)}^T + \phi_{Phmodel(i,j)}^T \quad (4.4)$$

$$\hat{\phi}_{topo(i,j)}^T = \phi_{PSItopo(i,j)}^T + \phi_{PStopo(i,j)}^T \quad (4.5)$$

A acurácia dos resultados do PSI depende de muitos parâmetros, como: número de imagens SAR, distribuição espacial dos PSs, condições climáticas, distância do PS ao ponto de referência e qualidade dos PSs na área de interesse. Normalmente, para um conjunto de 20 a 30 imagens, o erro em medidas individuais do PS é da ordem de $\pm 5\text{mm}$ (Paradella et al., 2015b).

4.3.3 Levantamento de campo

A mineradora Samarco, responsável pelas minas do complexo de Germano em estudo, estabeleceu uma estação de monitoramento com diversos equipamentos, como: acelerômetros para monitorar vibrações no solo; drones para adquirir imagens que auxiliam nas inspeções em áreas de difícil acesso; estações meteorológicas, as quais medem índices pluviométricos, temperatura do ar, umidade, pressão, velocidade e direção do vento; estações robóticas e prismas para monitorar, de forma precisa, os deslocamentos horizontais e verticais, entre outros.

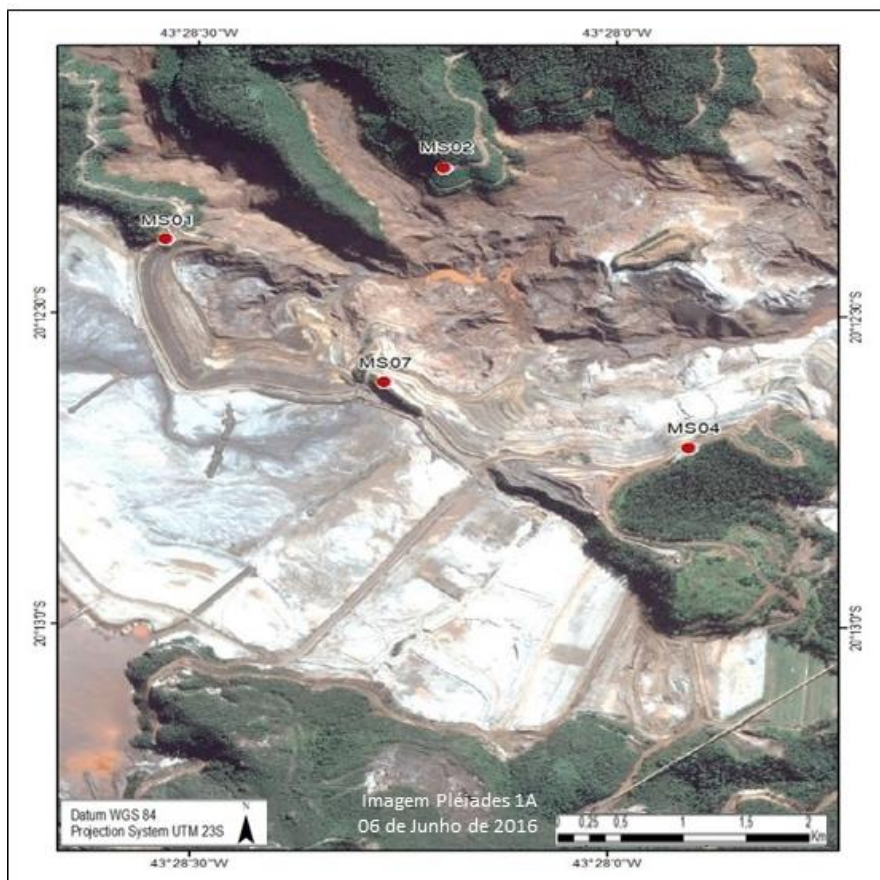
A técnica DInSAR e suas derivadas (DTS, PSI, etc) detectam deslocamentos ocorridos na linha de visada do satélite (LoS), como já mencionado anteriormente. As medições topográficas, por outro lado, fornecem deslocamentos horizontais e verticais. Foi necessário projetar na LoS os deslocamentos obtidos com topografia para que fosse feita a comparação entre os resultados das duas técnicas. Essa conversão foi feita através da Equação 4.6.

$$P_{LoS} = P_x \cos\theta \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, P_{LoS} corresponde a medida de deslocamento da topografia transformada para LoS, P_x é a medida de campo do prisma e θ é o ângulo de incidência médio, cujo valor para as imagens utilizadas no trabalho é de 35° . A comparação dos resultados foi feita para duas estruturas: diques de Sela & Tulipa e Selinha, devido ao período compatível de informações adquiridas com topografia e com imagens SAR. O período de comparação dos resultados obtidos entre as técnicas foi de aproximadamente 3 meses (01 de abril a 27 de julho de 2017).

Segundo relatório interno, no monitoramento dos diques de Sela & Tulipa e Selinha foram utilizados quatro marcos de centragem forçada (Figura 4.9) (MS01, MS02, MS04 e MS07). O monitoramento se deu a partir de um único ponto (MS02) e os demais marcos foram utilizados como referência para a estação. As maiores distâncias de monitoramento (distância entre o marco MS02 e o prisma visado) foram de 852,98m e 815,47m para os diques de Sela & Tulipa e Selinha, respectivamente. Com base nos erros angulares, apresentados na seção 4.1.3, e nas distâncias de monitoramento, chegou-se ao valor de $\pm 8\text{mm}$ de erro de monitoramento para ambas as estruturas monitoradas. Para fins de análise dos resultados, a mineradora optou por estabelecer o limite de duas vezes o erro nominal, sendo então aceitável um erro de $\pm 16\text{mm}$, denominado erro acumulado. O erro acumulado projetado em LoS equivale a $\pm 13\text{mm}$, dessa forma, valores de deslocamento vertical projetados em LoS dentro do intervalo de $\pm 13\text{mm}$ foram interpretados como erros aleatórios, enquanto variações fora desse intervalo provavelmente expressam deformação real.

Figura 4.9 - Localização dos marcos de centragem forçada.



Fonte: Produção do autor.

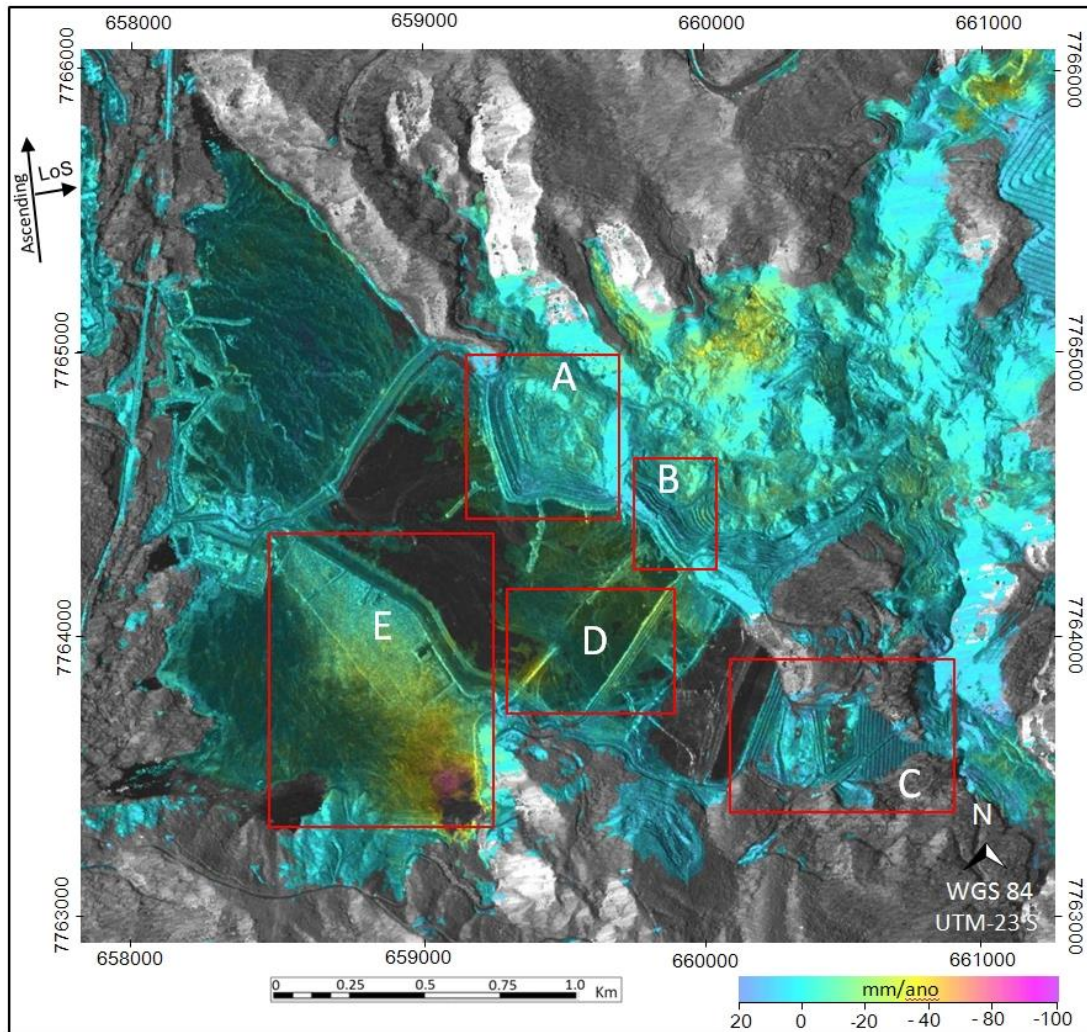
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará os resultados obtidos no processamento DTS, seguido dos resultados obtidos com a técnica integrada e a comparação com os resultados obtidos com topografia.

5.1 Resultados DTS

O mapa de velocidade de deslocamento obtido pelo processamento DTS está apresentado na Figura 5.1 e o mapa representando os erros do MDS na Figura 5.2. Na Figura 5.1 os deslocamentos negativos representam deformações de subsidência, enquanto os deslocamentos positivos representam soerguimento, em LoS. Os *pixels* da imagem que não apresentam a cor da escala de mm/ano são os *pixels* que não apresentaram coerência interferométrica superior a 0,45 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.

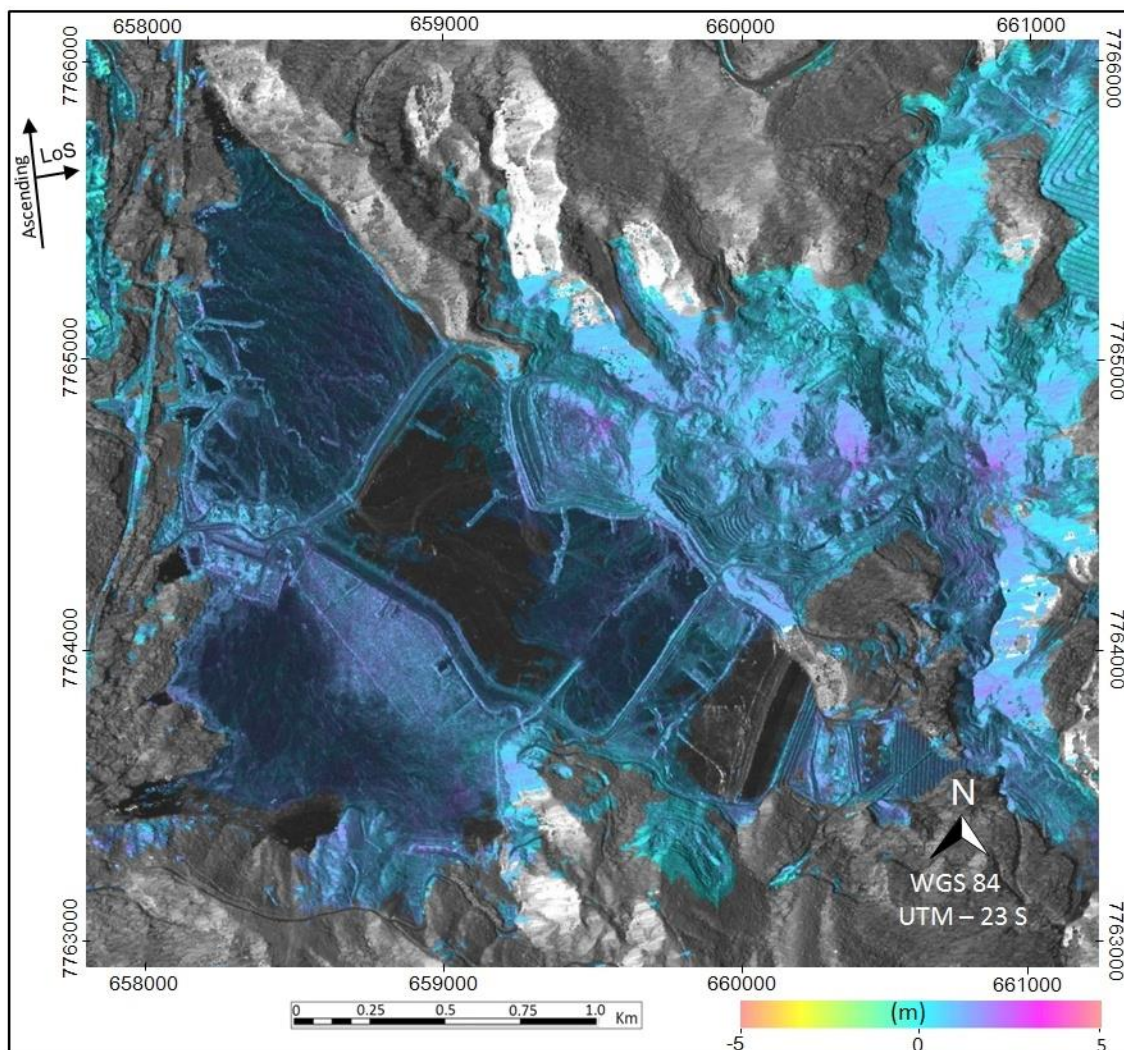
Figura 5.1 - Mapa de deslocamento com DTS.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.1 estão apresentadas as estruturas do dique de Sela e Tulipa (A), dique de Selinha (B), barragem Principal de Germano (C), diques auxiliares para acesso para veículos para monitoramento do reservatório de Germano (D) e barragem Baia 3 (E). Nota-se um padrão de estabilidade (cor azul clara) nos diques de Sela e Tulipa, dique de Selinha e na barragem Principal de Germano. Nos setores D e E, nota-se um processo de acomodação do solo causado pela não deposição de materiais após o acidade na barragem de Fundão, bem como devido a passagem de veículos pesados nestes setores.

Figura 5.2 - Mapa de erros do MDS obtido com DTS.

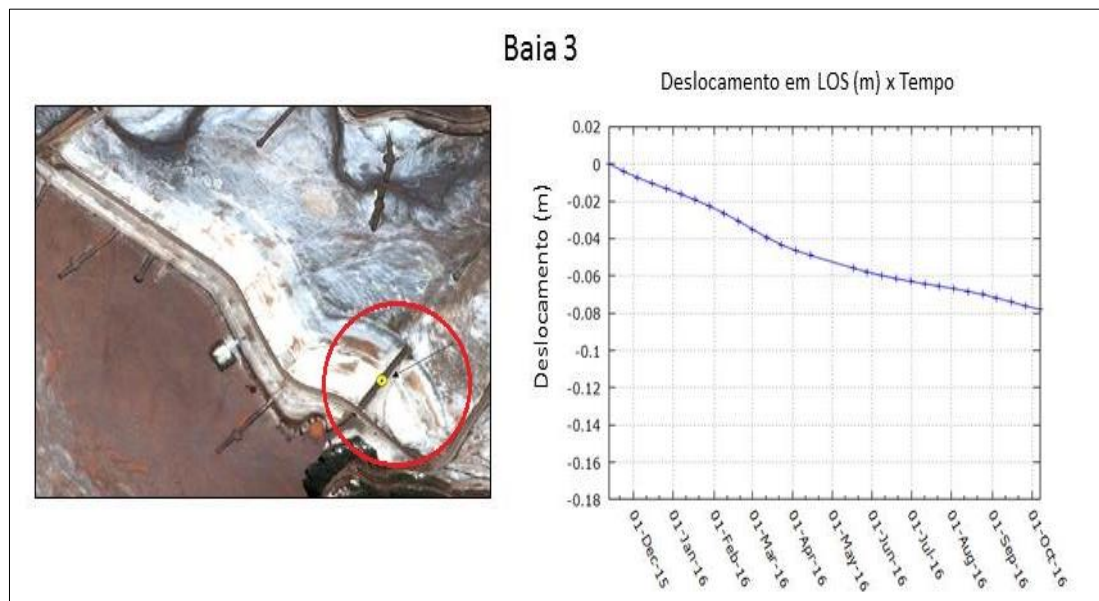


Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.2 apresenta erro do MSD, praticamente sistemático, em toda a imagem, da ordem de 1 a 2m. Esse erro pode ter sido ocasionado na geração do MDS sem pontos de controle.

Analisando a Figura 5.1 nota-se que os maiores valores de subsidência foram detectados em Baía 3 (E) e seu reservatório, o qual acomoda rejeitos finos. Nessa estrutura houve deslocamentos acumulados (deslocamento ocorrido entre a data final e a inicial) em LoS de até -8mm (subsidência), como mostra a Figura 5.3.

Figura 5.3 - Deslocamentos detectados com a DTS na Baía 3.

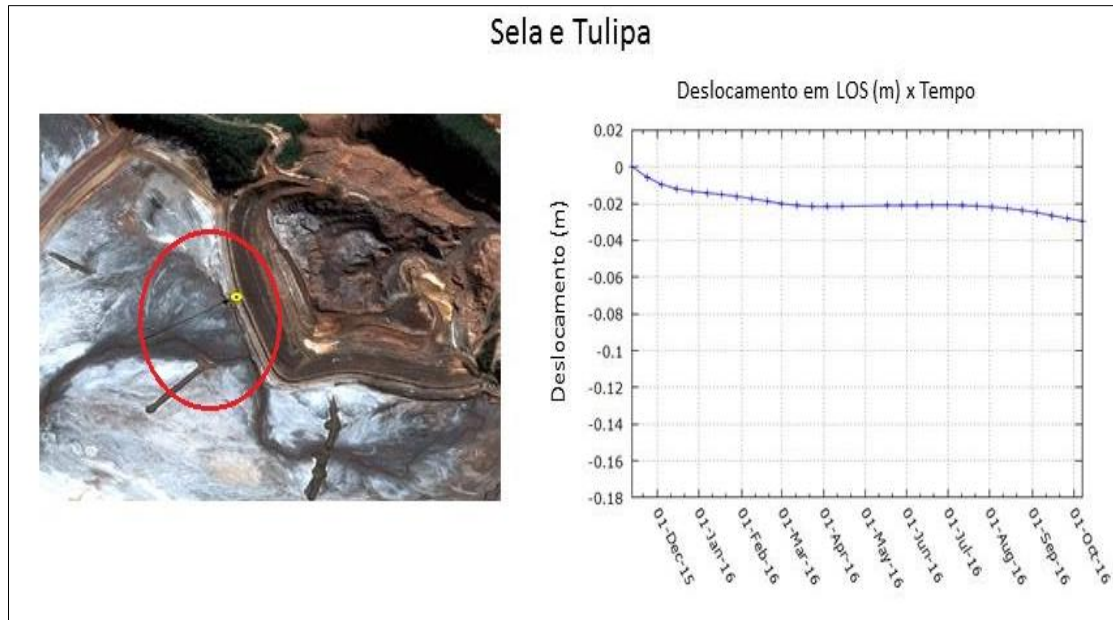


Fonte: Produção do autor.

Para o dique de Sela & Tulipa (A) foram detectados deslocamentos de até -3mm (Figura 5.4); No dique de Selinha (B) foram detectados deslocamentos de até -2mm (Figura 5.5) e no Barramento Principal (C) houve subsidência de até -4mm (

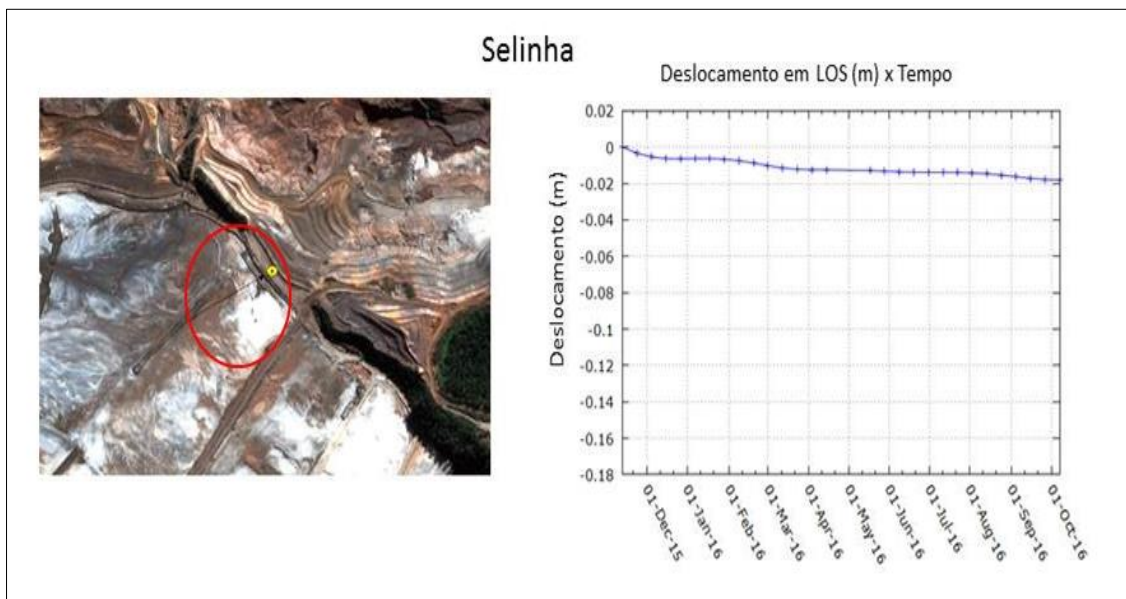
Figura 5.6). De maneira geral, considerando a precisão da DTS, essas estruturas apresentam estabilidade, embora a empresa não tenha estabelecido limites de aceitação para os deslocamentos. Convém ressaltar que nos diques Sela & Tulipa e Selinha, houve deposição de material para reforçar estas estruturas após o acidente na barragem de Fundão, que podem estar sofrendo um processo de acomodação. O trecho do barramento principal, construído com rejeito compactado (Figura 5.6), é utilizado para tráfico de veículos pesados, o que pode explicar o deslocamento superficial ilustrado nesta figura.

Figura 5.4 - Deslocamentos detectados com a DTS no dique de Sela & Tulipa.



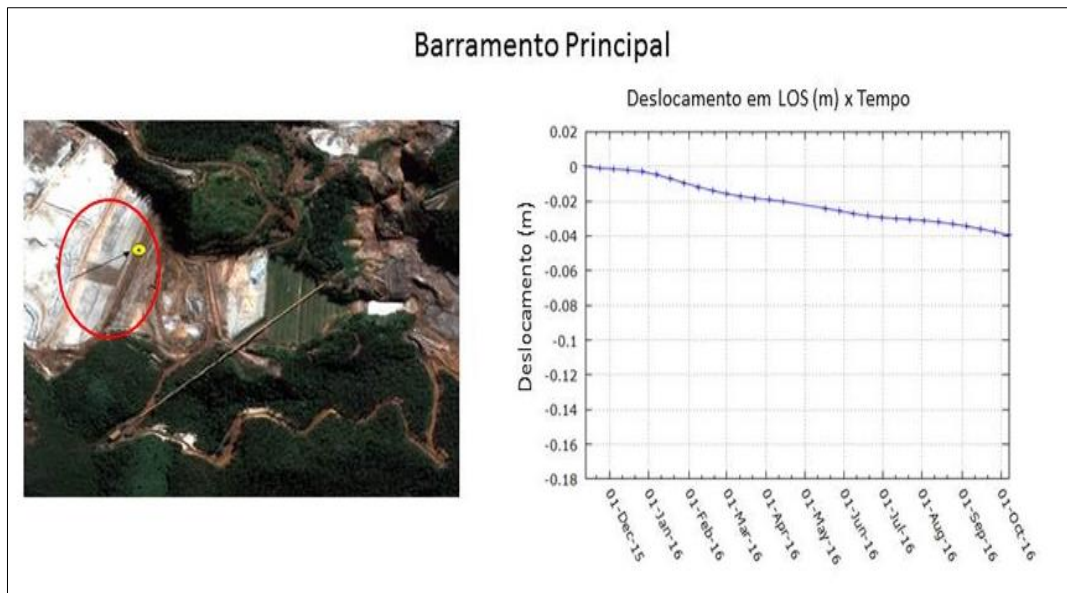
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.5 - Deslocamentos detectados com a DTS no dique de Selinha.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.6 - Deslocamentos detectados com a DTS no Barramento Principal.



Fonte: Produção do autor.

Embora tenham sido apresentados aqui os resultados da técnica DTS, esses serviram de entrada para a análise PSI, não sendo então considerados para maiores análises de deformação devido a sua precisão.

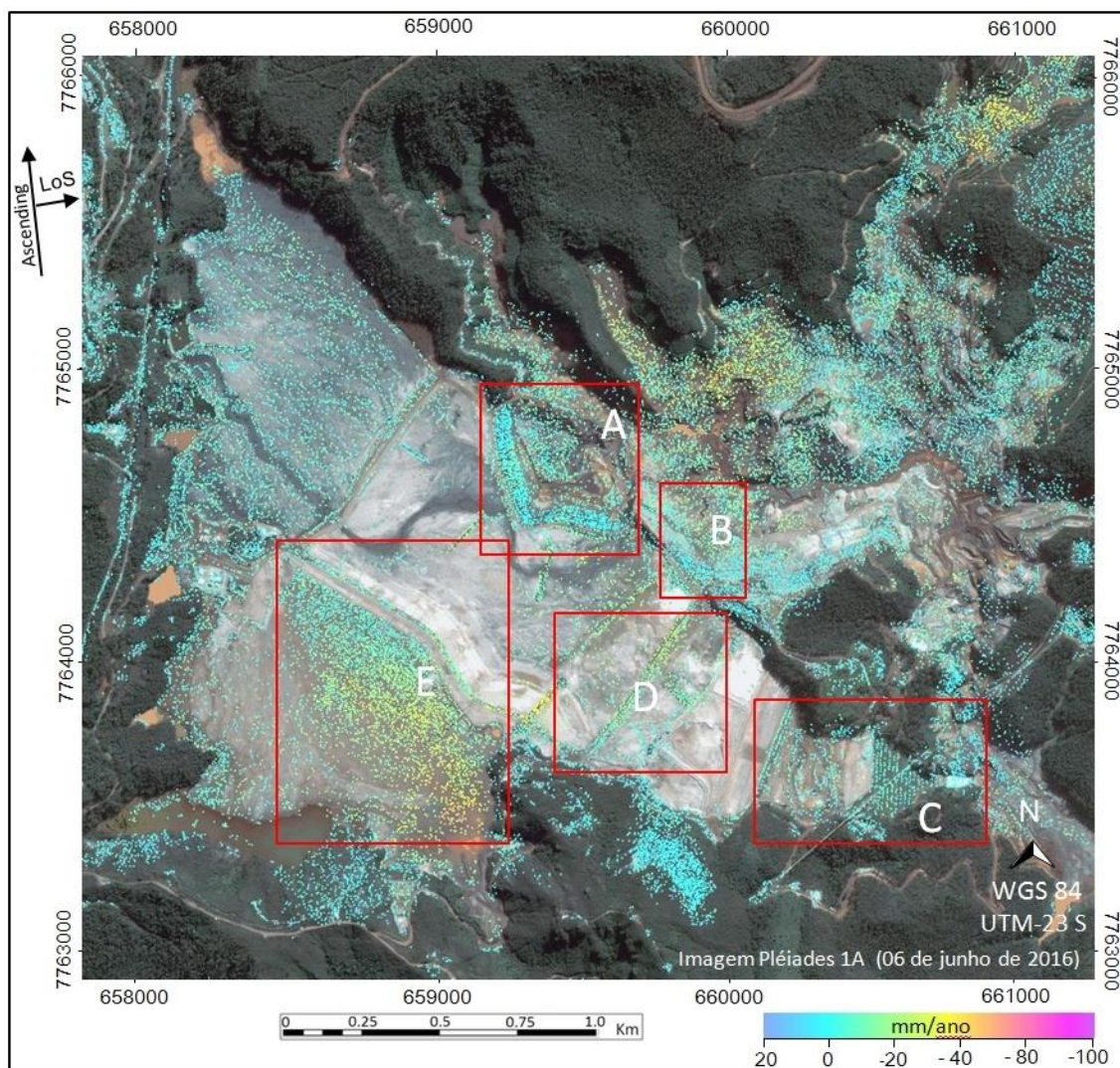
5.2 Resultado da técnica integrada DTS e PSI

Os deslocamentos detectados com análise PSI, utilizando informação prévia da fase do deslocamento e erro do MDS resultantes da DTS (Figura 5.1 e Figura 5.2, respectivamente), foram utilizados para gerar o mapa de velocidade (ou taxa) de deslocamento, que está apresentado na Figura 5.7

Os resultados apresentados na Figura 5.7 para o dique de Sela e Tulipa (A), dique de Selinha (B) e o Barramento Principal (C) apresentam padrões de taxas de deslocamentos insignificantes, representados pela coloração azul clara da simbologia dos PSs. Para as estruturas que serve de acesso para

veículos (D) e a Baía 3 (E), padrões de taxas de deslocamento podem ser observados pelos PSs com símbolos de cores que transitam entre amarelo e laranja.

Figura 5.7 - Mapa de velocidade de deslocamento da técnica integrada DTS e PSI.



Fonte: Produção do autor.

As medidas de deslocamento em LoS dos PS apresentados na Figura 5.7, foram obtidos em relação a um ponto de referência, selecionado dentro da área de interesse do estudo e admitido como sendo estável. A precisão dessas

medições pode ser estimada através da dispersão dos valores de PS em relação ao ponto de referência, expressa pelo desvio padrão da taxa de deslocamento, representada de acordo com Gamma (2013) pelas Equações 5.1 e 5.2 que seguem.

$$\sigma_{Vd(x,r)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\lambda}{\Delta t_i 4\pi} \phi_{PS_disp(i)} - \frac{\lambda}{4\pi} \phi_{PS_rate} \Delta t_i \right)^2} / \Delta t_i^2 \quad (5.1)$$

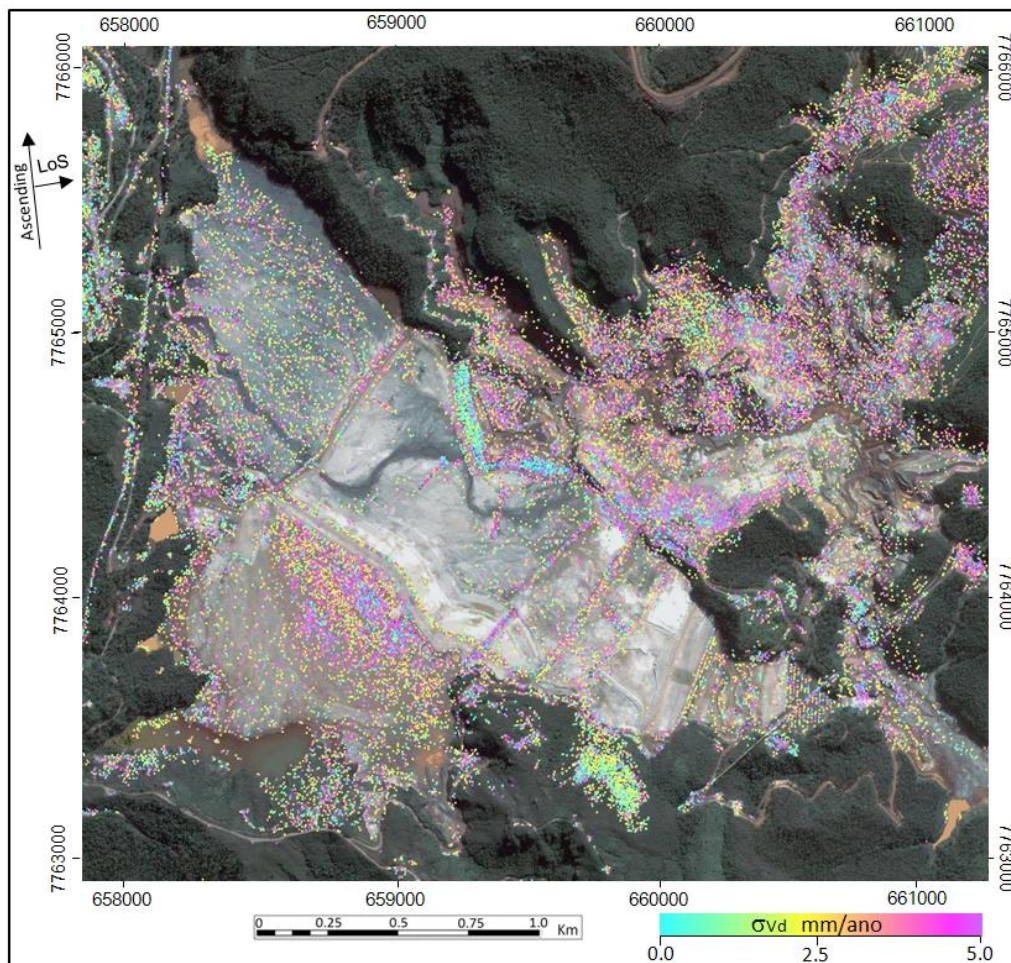
onde:

$$\phi_{PS_rate} = \sum_{i=1}^N \Delta t_i \phi_{PS_disp(i)} / \sum_{i=1}^N \Delta t_i^2 \quad (5.2)$$

Sendo $\phi_{PS_disp(i)}$ o deslocamento de fase de um PS durante o intervalo de tempo Δt_i e N o número de interferogramas.

A Figura 5.8 apresenta o mapa de desvio padrão das taxas de velocidade de deslocamento da superfície em LoS para cada ponto PS.

Figura 5.8 - Mapa do desvio padrão das taxas de deslocamento superficiais.



Fonte: Produção do autor.

Comparando o mapa de velocidade de deslocamento (Figura 5.7) e o mapa do desvio padrão da velocidade de deslocamento (Figura 5.8), o erro apresentado nessa é tão maior quanto maior for o deslocamento naquela.

5.2.1 Deslocamentos nos diques de Sela & Tulipa

Como mencionado na seção 4.3.3, para os diques de Sela & Tulipa e Selinha houve informações suficientes proveniente do levantamento topográfico, permitindo que essas informações fossem comparadas com os resultados de

deslocamento provenientes do processamento SAR. A Figura 5.9 e a Figura 5.10 ilustram a estrutura do dique de Sela & Tulipa e o reservatório de Fundão (vazio), respectivamente.

Figura 5.9 - Dique de Sela & Tulipa.



Fonte: Produção do autor.

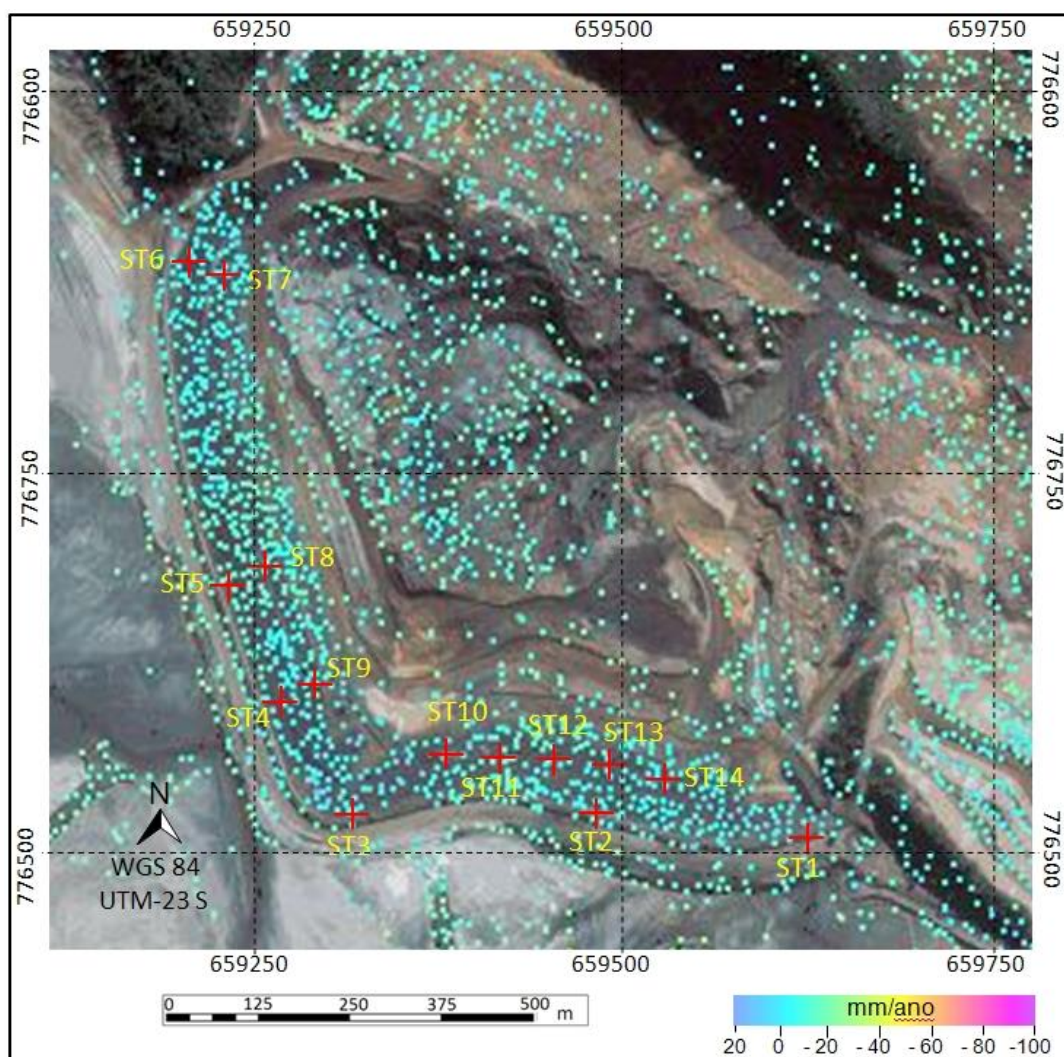
Figura 5.10 - Reservatório de Fundão (vazio)



Fonte: Produção do autor.

Foram então analisados 12 pontos de localização dos prismas monitorados, como ilustrado na Figura 5.11. Foram selecionados os PS's mais próximos da localização dos prismas.

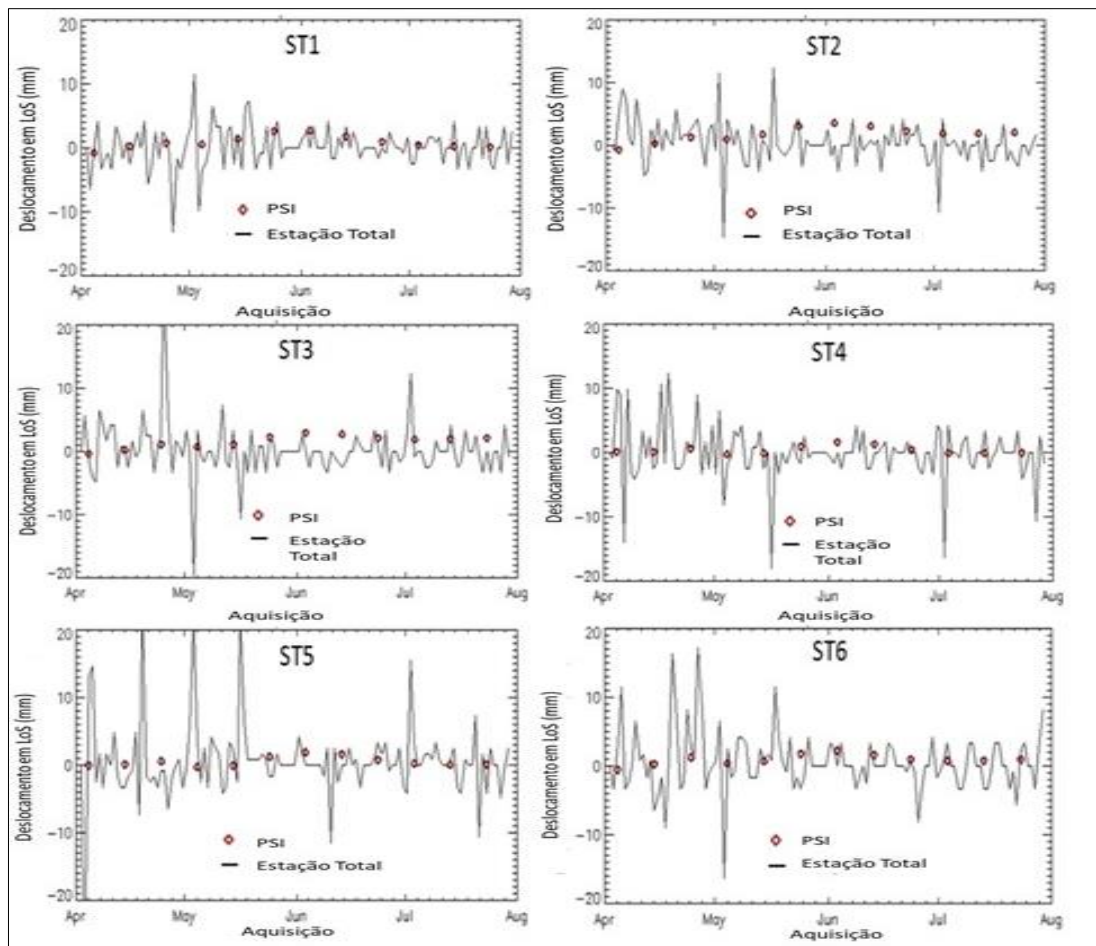
Figura 5.11 – Mapa de velocidade de deslocamento e pontos monitorados no dique de Sela & Tulipa.



Fonte: Produção do autor.

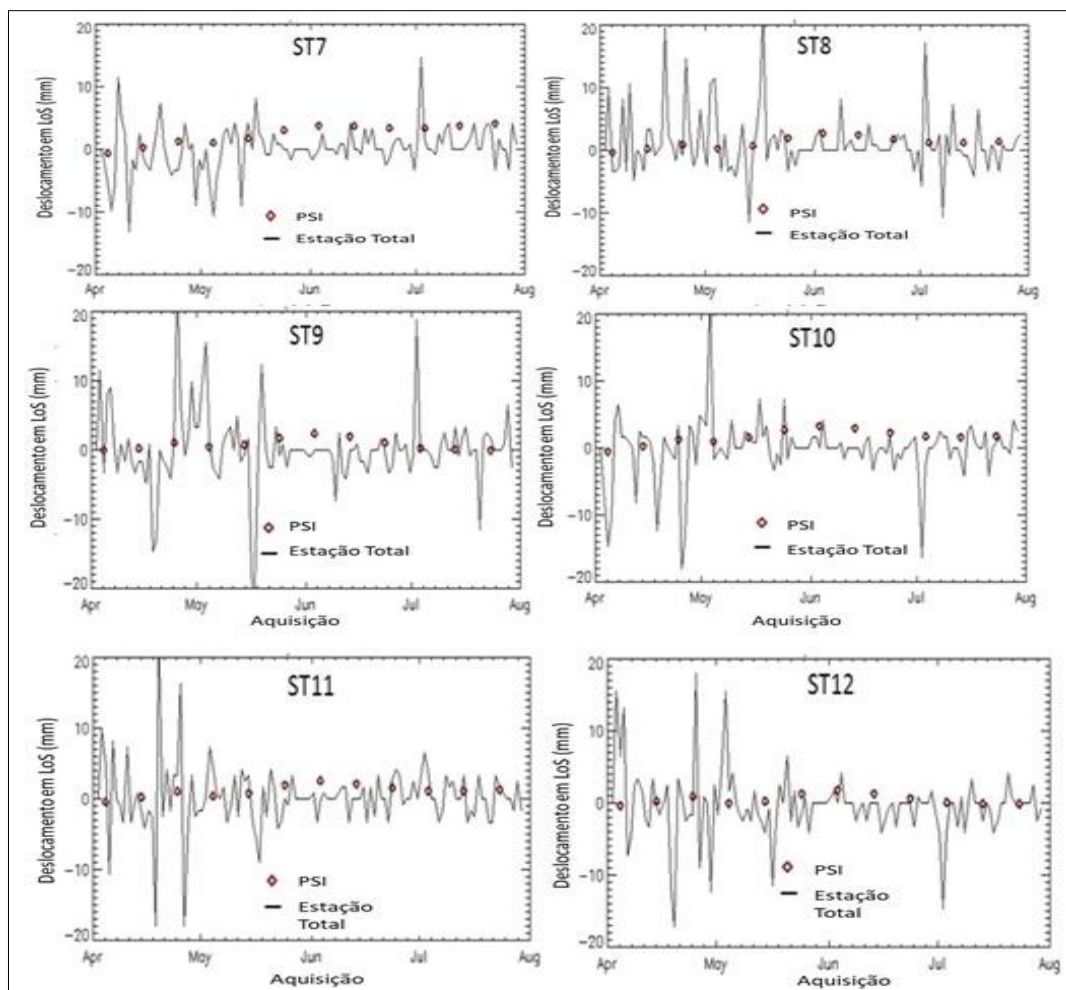
Os resultados obtidos com as duas técnicas foram colocados em gráficos para realizar as análises. A Figura 5.12 apresenta os deslocamentos em LoS dos pontos ST1, ST2, ST3, ST4, ST5 e ST6, e a Figura 5.13 apresenta os deslocamentos em LoS dos pontos ST7, ST8, ST9, ST10, ST11 e ST12. Para essa comparação foi selecionado o PS mais próximo de cada ponto (prisma).

Figura 5.12 - Gráficos com os deslocamentos em LoS obtidos com o processamento PSI e as medições topográficas para os pontos ST1, ST2, ST3, ST4, ST5 e ST6.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.13 - Gráficos com os deslocamentos em LoS obtidos com o processamento PSI e as medições topográficas para os pontos ST7, ST8, ST9, ST10, ST11 e ST12.



Fonte: Produção do autor.

Os gráficos de deslocamentos, apresentados na Figura 5.12 e na Figura 5.13, mostram que as medições obtidas com topografia e projetadas em LoS apresentam variações dentro do erro acumulado (também projetado em LoS) de $\pm 13\text{mm}$, com uma tendência de deslocamento muito baixa. As medidas de deslocamento acumulado obtidas com PSI também apresentaram baixos valores e baixa tendência de deslocamento.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* – RMSE), derivado da diferença entre as medições topográficas e os resultados PSI, e também as taxas de deslocamento obtidas com cada técnica, para os pontos analisados na Figura 5.12 e na Figura 5.13.

Tabela 5.1 - RMSE e taxas de deslocamento dos 12 pontos monitorados no dique de Sela & Tulipa.

| Ponto | RMSE (mm) | Taxa - topografia (mm/ano) | Taxa - PSI (mm/ano) |
|--------------|------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| ST1 | 2,01 | 0,48 | 2,79 |
| ST2 | 2,63 | -1,01 | 3,17 |
| ST3 | 2,42 | 0,08 | 2,94 |
| ST4 | 3,59 | -0,64 | -1,32 |
| ST5 | 4,31 | -1,35 | -0,34 |
| ST6 | 3,16 | 0,19 | 2,33 |
| ST7 | 3,47 | 1,06 | 4,15 |
| ST8 | 2,74 | 0,28 | 1,97 |
| ST9 | 1,97 | 0,91 | 1,91 |
| ST10 | 5,04 | 1,10 | 4,18 |
| ST11 | 2,38 | -0,04 | 4,29 |
| ST12 | 3,03 | -1,20 | 2,69 |

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 5.1 mostra que a tendência da taxa (mm/ano) dos deslocamentos obtida com topografia é muito baixa para os 12 pontos monitorados, não apresentando nenhum ponto com taxa superior ao erro de $\pm 13\text{mm}$. Os

deslocamentos obtidos com a técnica PSI, para os PSs mais próximos dos pontos (prismas) analisados, também apresentaram baixos valores de deslocamento, mesmo considerando o erro individual do PS de $\pm 5\text{mm}$, apresentado na seção 4.3.2. Para os alvos em que houve uma inversão dos deslocamentos (de negativo para positivo), entende-se que tal erro tenha se dado por erros intrínsecos a cada uma das técnicas. Observa-se que em alguns alvos a técnica PSI apresentou valores maiores de deslocamento que os valores obtidos com a topografia, o que pode ter acontecido por erros no processamento da técnica PSI, entre outros.

5.2.2 Deslocamentos no dique de Selinha

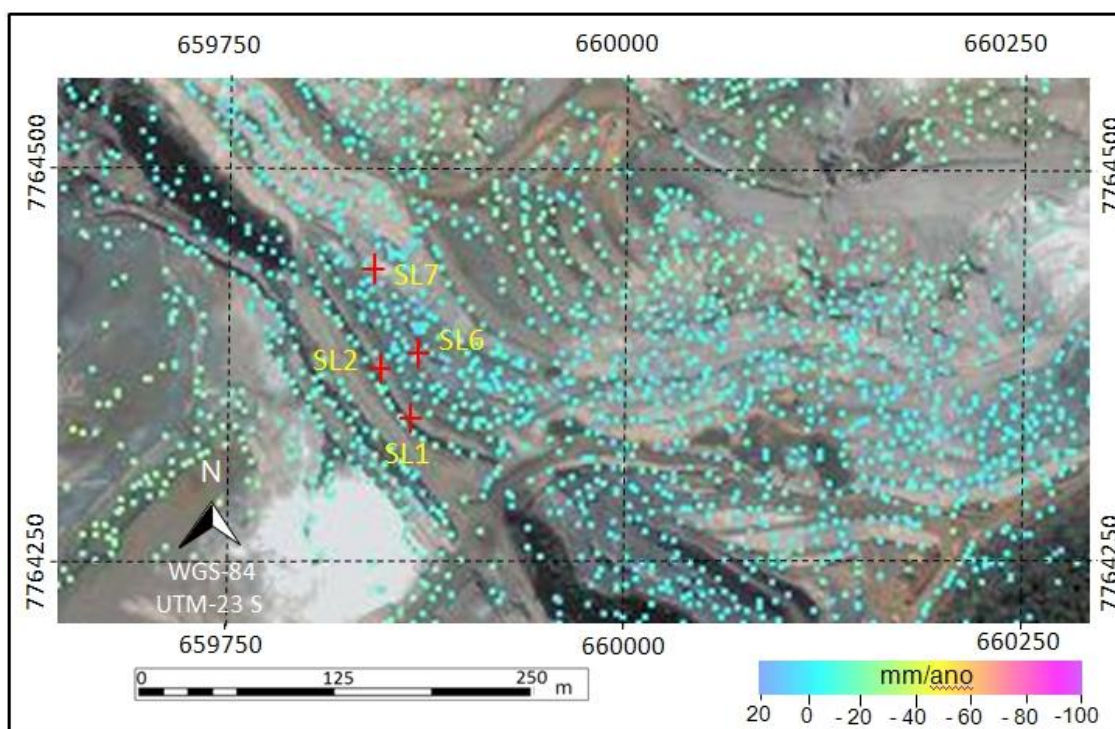
Para o dique de Selinha foram analisados 4 pontos, localizados na estrutura apresentada na Figura 5.14. Os deslocamentos estão apresentados na Figura 5.15.

Figura 5.14 - Dique de Selinha.



Fonte: Produção do autor.

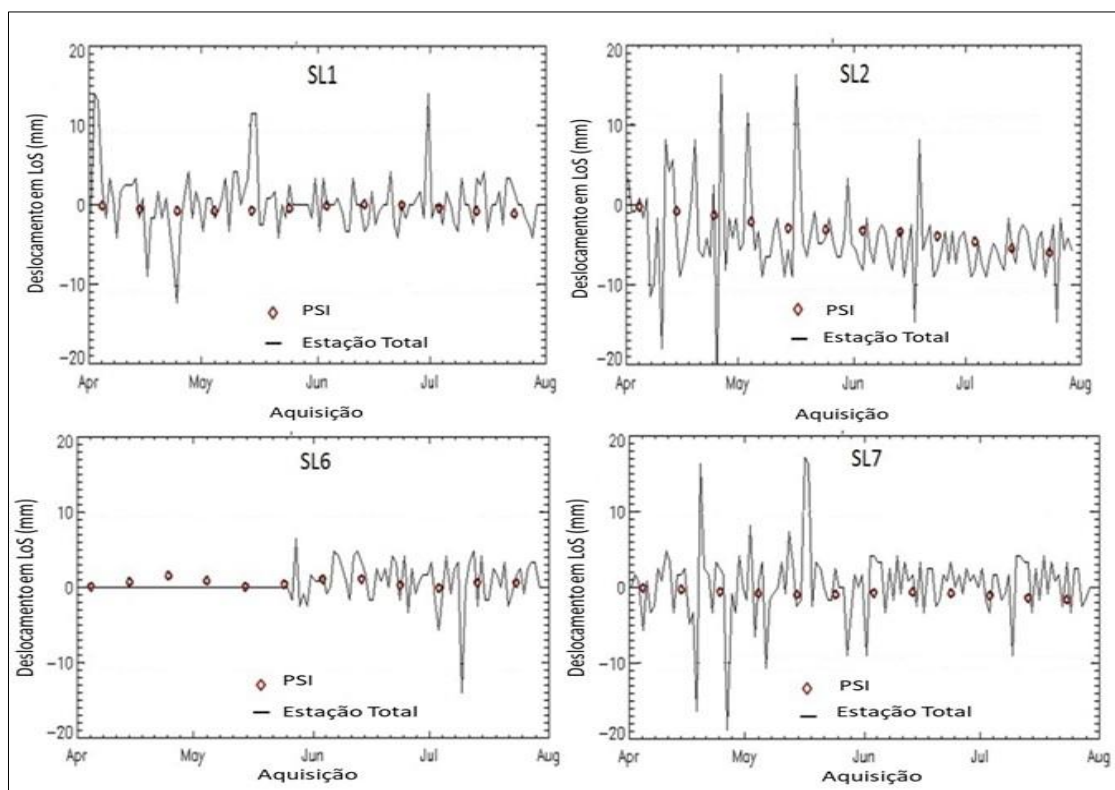
Figura 5.15 - Mapa de velocidade de deslocamento e pontos monitorados no dique de Selinha.



Fonte: Produção do autor.

Pela Figura 5.15 é possível notar, pela coloração dos pontos, que o dique de Selinha apresenta pouco deslocamento em sua superfície. A Figura 5.16 apresenta os gráficos com deslocamentos em LoS dos alvos SL1, SL2, SL6 e SL7 obtidos com ambas as técnicas. Os gráficos mostram que, assim como ocorreu no dique de Sela & Tulipa, os deslocamentos obtidos com topografia estão dentro do limite de erro de $\pm 13\text{mm}$, apresentando pouca tendência de deslocamento. Os resultados da técnica PSI também apresentaram baixos valores de deslocamento.

Figura 5.16 - Gráficos com os deslocamentos em LoS obtidos com o processamento PSI e as medições topográficas para os pontos SL1, SL2, SL6 e SL7.



Fonte: Produção do autor.

No ponto SL2 nota-se um pequeno deslocamento, medidos em ambas metodologias, o qual pode ser explicado, dentre outros motivos, pela deposição de material de reforço no dique após o rompimento da barragem de Fundão e, conseqüentemente, sua compactação no período de análise PSI.

A Tabela 5.2 apresenta o RMSE derivado da diferença entre as medições feitas com as duas técnicas e as taxas de deslocamento (mm/ano) para cada uma delas, para os 4 pontos monitorados entre abril e agosto de 2016 no dique de Selinha.

Tabela 5.2 - RMSE e taxas de deslocamento dos 4 pontos monitorados no dique de Selinha.

| Ponto | RMSE (mm) | Taxa - topografia (mm/ano) | Taxa - PSI (mm/ano) |
|--------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| SL1 | 3,64 | -0,62 | -0,19 |
| SL2 | 4,64 | -4,53 | -5,88 |
| SL6 | 0,32 | 1,07 | -0,71 |
| SL7 | 1,88 | 0,82 | -1,22 |

Fonte: Produção do autor.

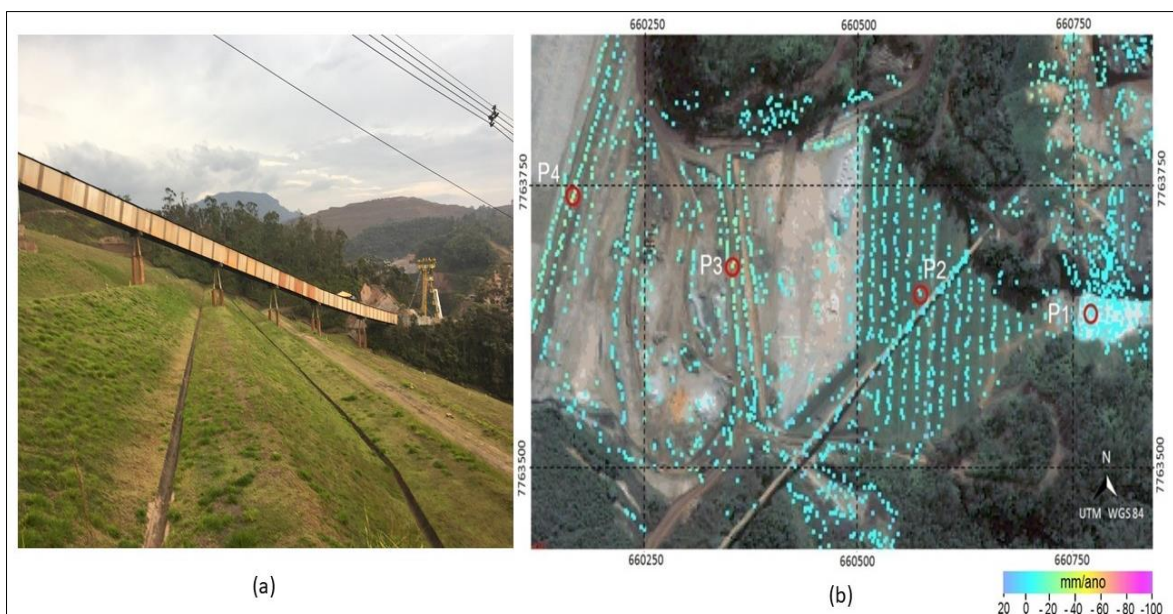
A Tabela 5.2 mostra que a tendência dos deslocamentos obtidos com topografia, para os 4 pontos em análise, está abaixo do limite de erro acumulado em LoS ($\pm 13\text{mm}$). Os deslocamentos obtidos com PSI também são baixos para os PSs mais próximos aos pontos listados acima. Para o ponto SL2, ambas as técnicas mostraram uma pequena tendência a subsidência, mas ainda dentro do erro acumulado de $\pm 13\text{mm}$, considerado, portanto, um ponto estável.

5.2.3 Deslocamentos no Barramento Principal

A Barragem Principal do complexo de Germano (setor C na Figura 5.7) não sofreu impacto direto do rompimento da barragem de Fundão, como os diques de Sela&Tulipa e Selinha sofreram. O monitoramento com estação total dessa estrutura foi feito por um período muito curto de tempo (menos de um mês) coincidente com o período de aquisição de imagens SAR utilizadas no trabalho. Devido a isso, não foi possível comparar os resultados obtidos com medições topográficas e com a técnica PSI. A Figura 5.17 mostra parte da Barragem Principal de Germano (a) e o mapa de deslocamentos (em mm/ano) bem como os pontos analisados (b). Na porção direita da Figura 5.17 (b) é possível notar um padrão de estabilidade, com os PS representados por símbolos pontuais de

cor azul clara, na parte mais íngreme da barragem, onde estão localizados os pontos P1 e P2. Na porção esquerda da Figura 5.17 (b), onde estão localizados os pontos P3 e P4, há um pequeno deslocamento no solo, causado pela compactação do solo e pelo tráfego de veículos pesados.

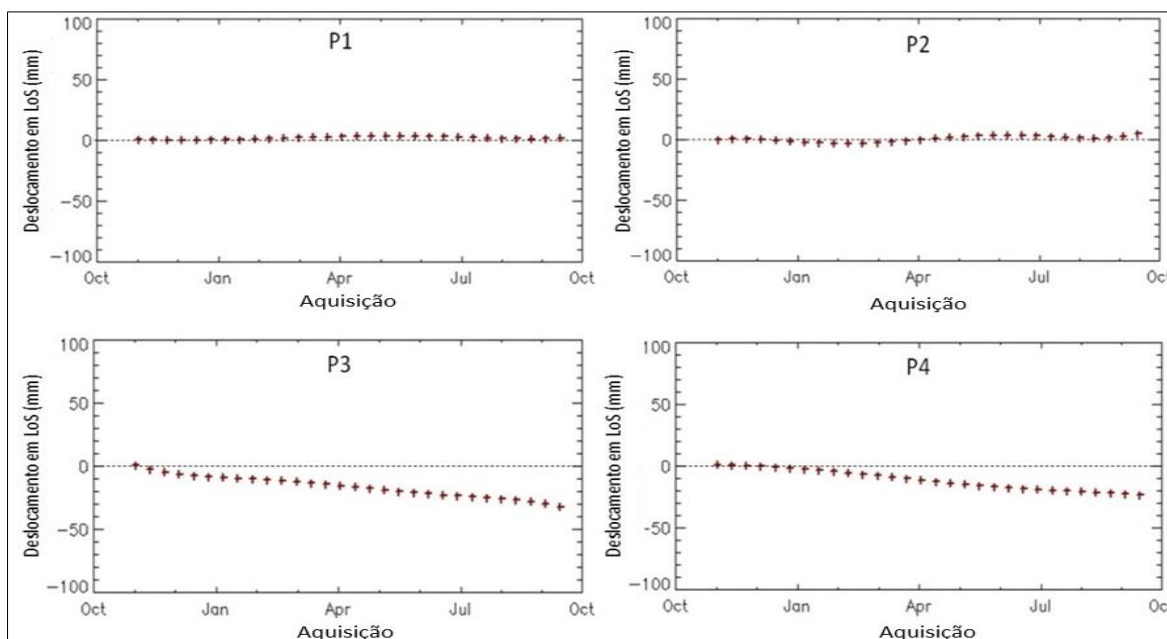
Figura 5.17 – Barramento Principal onde esta localizado o ponto P2 (a) e pontos analisados no mapa de deslocamento (mm/ano) na barragem de Germano.



Fonte: Produção do autor.

No setor direito da Figura 5.17(b), onde estão os pontos P1 e P2, é possível observar um padrão de estabilidade pela coloração azulada da escala de deslocamento. Já no setor do lado esquerdo da mesma figura, onde estão localizados os pontos P2 e P3, é possível observar um pequeno padrão de deslocamento na parte superior da da barragem (construída com rejeito compactado). Esse pequeno deslocamento pode ser explicado pela não deposição de rejeitos nesse reservatório, após o acidente, bem como o tráfego de veículos pesados nesse setor da barragem. A Figura 5.18 apresenta os gráficos de deslocamento acumulado, em LoS, para os quatro pontos apresentados na Figura 5.17 (b).

Figura 5.18 - Deslocamentos acumulados em LoS nos pontos P1, P2, P3 e P4 durante o período de novembro de 2015 a outubro de 2016.



Fonte: Produção do autor.

Os gráficos da Figura 5.18 mostram que os pontos P1 e P2 não apresentaram padrão de deslocamento, estando esses pontos localizados na parte mais íngreme da barragem. Por outro lado, os pontos P3 e P4 apresentaram valores de deslocamento acumulado em LoS de -30 e -22,7 milímetros, respectivamente, durante o período de 11 de novembro de 2015 a 18 de outubro de 2016, causados pelos fatores mencionados anteriormente.

5.2.4 Deslocamentos na Baía 3 e nos acessos para veículos

Os setores D e E do reservatório de Germano, mostrados na Figura 5.7, suportam estruturas que servem para delimitar as áreas de contenção de rejeitos e permitem o manuseio adequado do material. Como não há deposição de material desde o rompimento da barragem de Fundão, o solo sofreu compactação. Além disso, os diques dos setores D e E são utilizados para acessar os pontos de monitoramento do reservatório, causando também uma compactação devido ao tráfego de veículos pesados. A Figura 5.19 apresenta

os diques auxiliares do setor D. A Figura 5.20 apresenta a barragem e o reservatório Baia 3 do setor E. A Figura 5.21 apresenta o mapa de velocidade de deslocamento em LoS dos setores D e E.

Figura 5.19 - Diques auxiliares no setor D.



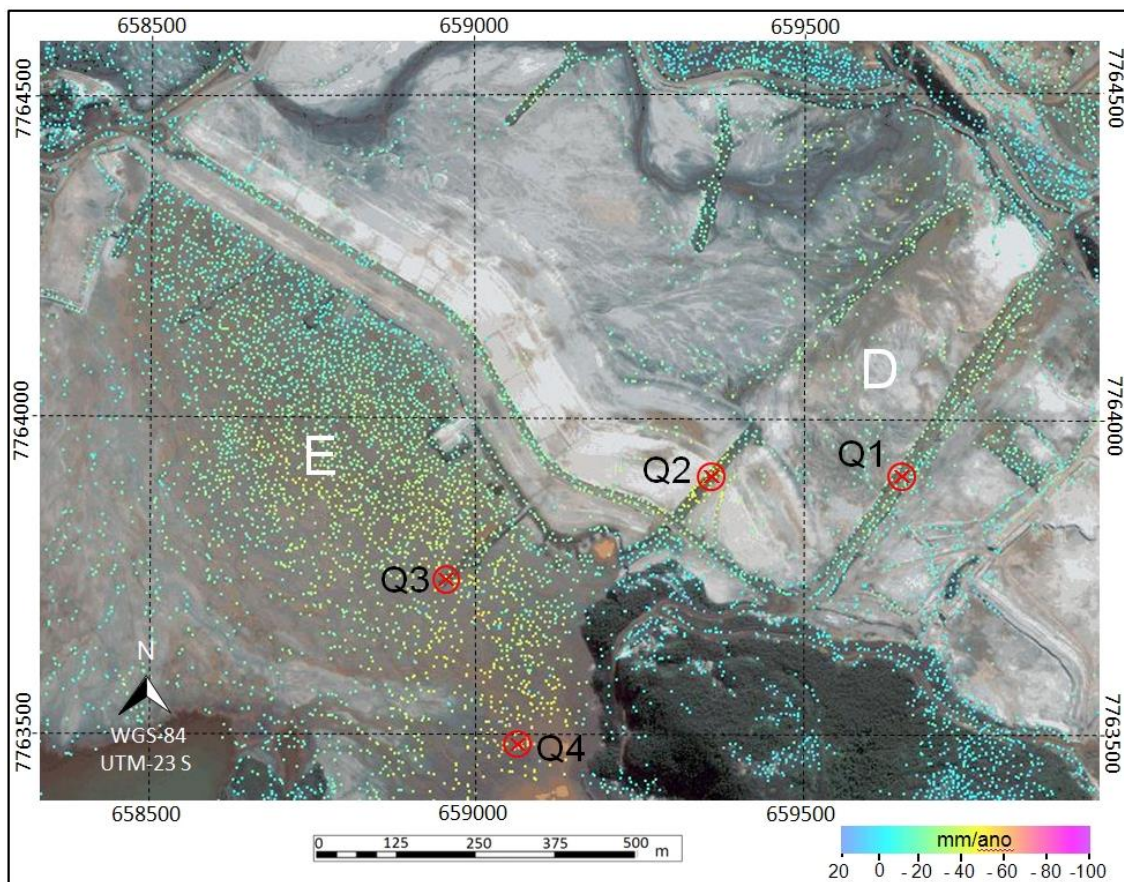
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.20 - Barragem e reservatório Baia 3 no setor E.



Fonte: Produção do autor.

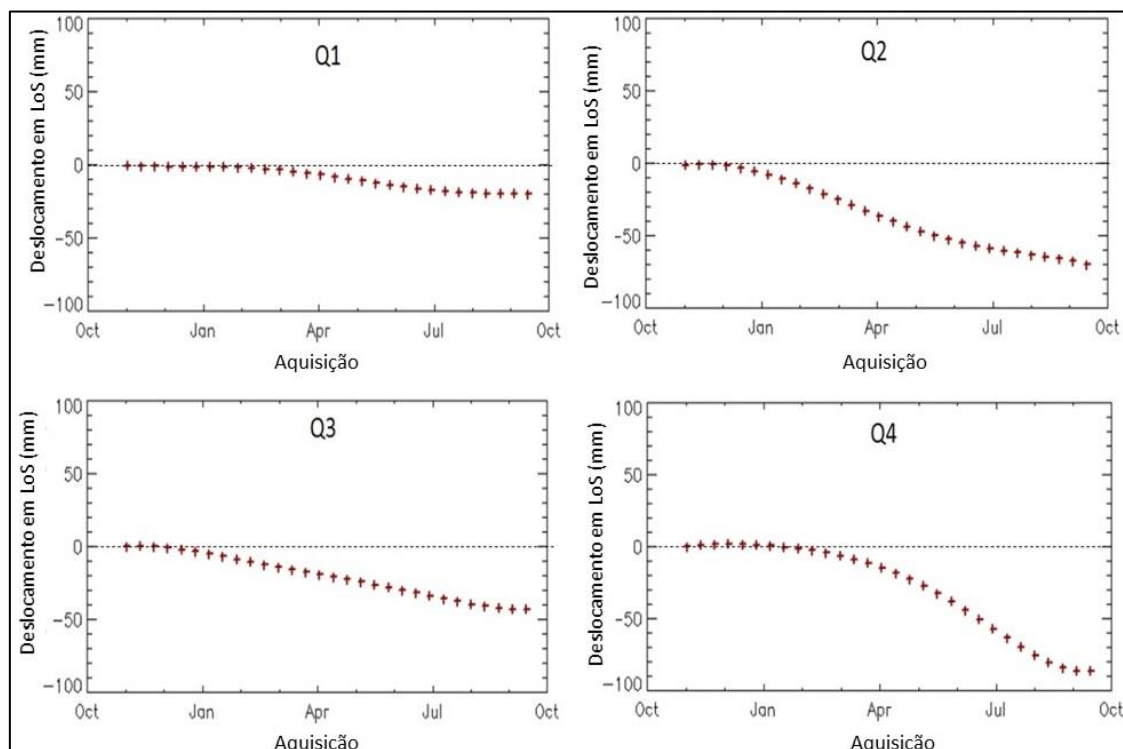
Figura 5.21 – Mapa de deslocamento em LoS (mm/ano) nos setores D e E.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.22 mostra os gráficos de deslocamentos acumulados para os pontos Q1, Q2, Q3 e Q4 apresentados na Figura 5.21, com valores de -20,02, -70,06, -43,07 e -86,36 milímetros, respectivamente, durante o período de 11 de novembro de 2015 a 18 de outubro de 2016.

Figura 5.22 - Deslocamento acumulado em LoS nos pontos Q1, Q2, Q3 e Q4.



Fonte: Produção do autor (2018).

Os pontos Q1 e Q2, localizados sobre diques no setor D, estão sofrendo deslocamento de subsidência devido ao processo de acomodação do material, uma vez que não houve mais deposição de rejeitos após o acidente. Além disso, há tráfego de veículo pesado nesses diques do setor D. Sendo assim, o deslocamento nesses pontos se dá por esses dois processos (acomodação e tráfego de veículos pesados). Os pontos Q3 e Q4, localizados no setor E, estão sofrendo um maior deslocamento devido ao processo de acomodação do material do reservatório da barragem. Nota-se que Q1 e Q2 sofreram deslocamentos menores que Q3 e Q4 por estarem localizados em diques com materiais mais compactados.

6 CONCLUSÕES

A integração das técnicas DTS e PSI utilizando dados TerraSAR-X, de alta resolução espacial e adquiridos em curtos intervalos de tempo (11 dias), abrangendo o período de novembro de 2015 a outubro de 2016 permitiu a detecção de deformações lineares e não-lineares de deslocamentos em LoS na superfície da barragem de Germano. Através dessa técnica que integra duas abordagens A-DInSAR (DTS e PSI) foi possível gerar informações sobre padrões de deslocamentos na área de estudo. Os resultados indicaram que as regiões dos diques de Sela & Tulipa e Selinha e do Barramento principal apresentam padrões de estabilidade.

Deslocamentos superficiais foram detectados em diques auxiliares sobre o reservatório de Germano, os quais delimitam o reservatório de Baia 3, que é destinado a receber rejeitos finos (lama) do processo de beneficiamento do minério de ferro. Como não houve deposição de material nesse reservatório desde o rompimento da barragem de Fundão, houve compactação de material no reservatório de Baia 3. Os diques auxiliares também foram utilizados para acessar pontos para monitoramento do reservatório, causando também uma compactação do solo devido ao tráfego de veículos pesados. As maiores taxas de deformação em LoS foram detectados na área do dique auxiliar do reservatório de Baia 3, alcançando valores de até -86,39mm/ano.

A validação dos resultados PSI com as observações medidas em campo com estação total e prismas refletores ficou limitada apenas aos diques de Sela&Tulipa e Selinha, durante o período de abril a agosto de 2016, devido a disponibilidade de dados neste período. Baseado na comparação entre os dois métodos, foi possível concluir que as diferenças encontradas não foram significantes, tendo em vista a precisão de cada técnica.

As vantagens das técnicas de A-DInSAR em relação ao levantamento topográfico ou mesmo radares de solo (que não foram utilizados neste trabalho) são que as medições podem ser feitas sem trabalho de campo e é possível obter informações detalhadas do deslocamento superficial, com escala

milimétrica, fornecendo uma visão sinóptica do fenômeno de deslocamento em grandes áreas, como é o caso das áreas ocupadas por atividades mineradoras, e sem grandes limitações meteorológicas como chuvas, presença de nuvens, entre outras. Como esta técnica não constitui um monitoramento em tempo real, a integração com levantamento topográfico e radares de solo é recomendada para fins operacionais como gestão de riscos, planejamento e alarme.

Apesar das limitações das técnicas interferométricas como decorrelações, detecção na linha de visada do satélite, quando da utilização de imagens adquiridas com uma única visada, os resultados obtidos foram satisfatórios porque houve proximidade nas medições realizadas com os dois métodos (interferométrico e topográfico). Além disso, os deslocamentos detectados que chamaram a atenção, como a subsidência no reservatório de Baía 3, puderam ser explicados com a visita técnica em campo, o que confere credibilidade aos deslocamentos detectados com a técnica integrada A-DInSAR.

Baseados nos resultados obtidos, e em comparação com os dados medidos em campo (levantamento topográfico), podemos concluir que os resultados da análise de A-DInSAR foram alcançados.

Para trabalhos futuros é recomendada a utilização de imagens obtidas com órbitas ascendente e descendente, ou seja, duas visadas, para que seja possível decompor o deslocamento nas componentes verticais e horizontais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, p. 29 –58, 1998.

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.7, n.4, p. 349-364, 1977.

AIRBUS DEFENCE AND SPACE. **TerraSAR-X image product guide**.

Disponível em: < https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_tsx-productguide_i2.01.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2018.

BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse problems**, v. 14, n. 4, p. 55, 1998.

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, p. 2375–2383, 2002.

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. Sar monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 7 pt1, p. 1685–1701, 2003.

COLESANTI, C.; MOUELIC, L.; BENNANI, M.; RAUCOULES, D.; CARNEC, C.; FERRETTI, A. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique – a case study in the east of France. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, p. 201-207, 2005.

COSTANTINI, M. A novel phase unwrapping method based on network programming. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 813-831, 1998.

CROSETTO, M.; CRIPPA, B.; BIESCAS, E.; MONSERRAT, O.; AGUDO, M. State of the art of land deformation monitoring using differential sar interferometry. In: ISPRS INTERNATIONAL WORKSHOP, 2005.

Proceedings... 2005.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; CRIPPA, B. Persistent scatterer interferometry: a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 78–89, 2016.

DORR, J.V.N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Washington: USGS, 1969. 110P. (Paper USGS/Geological Survey Professional, n.611-A).

FARR, T. G.; KOBRICK, M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. **EOS, transactions american geophysical union**, v. 81, n. 48, p. 583–585, 2000.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in sar interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 1, p. 8–20, 2001.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential sar interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2202–2212, 2000.

GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. B7, p. 9183, 1989.

GAMA, F. F.; CANTONE, A.; SANTOS, A. R.; PASQUALI, P.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; SILVA, G. 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. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE

SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), Milan, Italy. **Proceedings...** IEEE, 2015

GOLDSTEIN, R.M.; WERNER, C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 21, p. 4035-4038, 1998.

GOLUB, G. H.; VAN LOAN, C. **Matriz computations**. 2.ed. Baltimore, USA: The Johns Hopkins University Press, 1989. 300p.

GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 763–768, 1974.

HAWLEY, M.; MARISSETT, S.; BEALE, G., STACEY, P. **Performance assessment and monitoring**. In: Read, J.; Stacey, P. Guidelines for open pit slope design. Collingwood: Editora CSIRO, 2009. cap. 12, p.327-379.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. Introduction. In: _____(Eds.). **Principles and applications of imaging radar**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 866 p.

HERRERA, G.; TÓMAS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; DELGADO, J.; MALLORQUI, J.J.; DUQUE, S.; MULAS, J. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). **Engineering Geology**, v. 90, p.148-159, 2007.

HOOPER, A.; SEGALL, P.; ZEBKER, H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. **Journal of Geophysical Research**, v.111, n.B7, 07407, 2007.

IBAMA. **Laudo técnico preliminar**: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Disponível em:
<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2018.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment**. [S.l: s.n.] , 2007.

KAMPES, B. M. **Radar interferometry**: persistent scatterer technique. Dordrecht: Springer, 2006. 211 p. ISBN (1-4020-4576-X).

LAGIOS, E.; PAPADIMITRIOU, P.; NOVALI, F.; SAKKAS, V.; FUMAGALLI, A.; VLACHOU, K.; DEL CONTE, S. Combined seismicity pattern analysis, DGPS and PSInSAR studies in the broader area of Cephalonia (Greece).

Tectonophysics, v.524-525, p. 43-58, 2012.

MARSHAK, S.; ALKMIM, F.F. Proterozoic extension/contraction tectonics of the southern São Francisco Craton and adjacent regions, Minas Gerais, Brazil: a kinematic model relating Quadrilátero Ferrífero, São Francisco Basin and Cordilheira do Espinhaço. **Tectonics**, v.8, n.3, p.555-571, 1989.

MASSONET, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; ADRAGNA, F.; PELTZER, G.; FEIGL, K.; RABAUTE, T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**, v. 363, p. 210–211, 1993.

MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. **Reviews of Geophysics**, v. 36, n. 4, p. 441, 1998.

MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA, P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K. P. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, p. 6–43, 2013.

MURA, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico**: sistema Geo-InSAR. 2000. 159 p. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24>>.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. Monitoramento de deformações de superfície em mina de ferro a céu aberto (N5WCarajás) utilizando série temporal de Interferometria Diferencial SAR

(DInSAR), baseado em dados do satélite TerraSAR-X. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 0911-0918.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SILVA, G. G.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, A. Monitoring of non-linear ground movement in an open pit iron mine based on an integration of advanced dinsar techniques using terrasarsar-x data. **Journal of Remote sensing**, v. 8, n. 5, 2016.

OSMANOGLU, B.; DIXON, T. H.; WDOWINSKI, S.; CABRAL-CANO, E.; JIANG, Y. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, p. 1-12, 2010.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; RIBEIRO, A. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 6, p. 797–811, 2012.

PARADELLA, W.R.; MURA, J.C.; GAMA, F.F.; SANTOS, A.R.; GALO, M.; CAMARGO, P.O.; SILVA, A.Q.; SILVA, G.G. **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.** São José dos Campos: INPE, 2015a. (Relatório Científico Final, Processo FAPESP 2010/51267-9).

PARADELLA, W. R.; FERRETI, A.; MURA, J. C.; COLOMBO, D.; GAMA, F. F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, R. A.; NOVALLI, F.; GALO, M.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G., GOMES, L. L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis, **Engineering Geology**, v.193, p.61-78, 2015b.

PELTIER, A.; BIANCHI, M.; KAMINSKI, E.; KOMOROWSKI, J. C.; RUCCI, A.; STAUDACHER, T. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano

- ground deformation: validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. **Geophysical Research Letters**, v. 37, L12301, 2010.
- PINTO, C. A.; PARADELLA W. R.; MURA J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS A. R.; SILVA, G. G.; HARTWIG M. E. Applying persistent scatterer interferometry for surface displacement mapping in the Azul open pit manganese mine (Amazonregion) with TerraSAR-X StripMap data. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, 095978, 2015.
- RANEY, R. K. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Org.). . **Radar fundamentals: technical perspective**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. 866 p. 2.
- ROSEN, P. A.; HENSLEY, S.; JOUGHIN, I. R.; LI, F. K.; MADSEN, S. N.; RODRIGUEZ, E.; GOLDSTEIN, R. M. Synthetic aperture radar interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, p. 333–382, 2000.
- SCHMIDT, D. A.; BÜRGMANN, R. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara Valley, California from a large InSAR data set. **Journal Geophysical Research**, v. 108, n.B9, p. 2416-2429, 2003.
- SILVA, G. G.; MURA, J. C.; PARADELLA W. R.; GAMA, F. F.; TEMPORIM, F. A. Monitoring of ground movement in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon region) based on A-DInSAR techniques using TerraSAR-X data. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, p. 026027, 2017
- STRAMONDO, S.; CHINI, M.; BIGNAMI, C.; SALVI, S.; ATZORI, S. X-, C-, and L-band DInSAR investigation of the april 6, 2009, Abruzzi Earthquake. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, p.49-53, 2011.
- TEMPORIM, F. A.; GAMA, F. F.; MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; SILVA, G. G. Application of persistent 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**, v. 47, p. 225-235, 2017.

USAI, S. A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 24., 2002, Toronto, Canada.

Proceedings... Toronto, Canada: IEEE, 2002. p.1247-1250.

SANT'ANNA, S. J. S. **Avaliação do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens de radar de abertura sintética**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1994.

VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D.; BARAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JUNIOR, H. A. Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, p.1409-1425, 2009.

WEGMULLER, U.; WALTER, D.; SPRECKELSS, V.; WENER, C. L. Nonuniform ground deformation monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 2, p. 895-904, 2010.

WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2003, Toulouse, France. **Proceedings...** IEEE, 2003. p. 4362–4364.

ZAN, F.; GUARNIERI, A. M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. **IEEE Transactions on Geoscience**, v.44, n. 9, p. 2352-2360, 2006.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959, Sept. 1992a.

ZEBKER, H. A.; MADSEN, S. N.; MARTIN, J.; ALBERTI, G.; VETRELLA, S.; CUCCI, A. The topsar interferometric radar topographic mapping instrument.

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 30, n. 5, p. 1595–1597, 1992b.

ZHOU, X.; CHANG, N.; LI, S. Applications of SAR interferometry in Earth and environmental science research. **Sensors**, v. 9, p. 1876–1912, 2009.