



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.09.15.39-TDI

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO EM PILHAS DE
DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (NWI, W E SIV) NO
COMPLEXO MINERADOR DE CARAJÁS COM USO
DE DADOS STRIPMAP DO SATÉLITE TERRASAR-X**

Heloísa da Silva Victorino

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Fábio Furlan Gama, e
Waldir Renato Paradella, aprovada
em 02 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LAKPKL>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.09.15.39-TDI

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO EM PILHAS DE
DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (NWI, W E SIV) NO
COMPLEXO MINERADOR DE CARAJÁS COM USO
DE DADOS STRIPMAP DO SATÉLITE TERRASAR-X**

Heloísa da Silva Victorino

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Fábio Furlan Gama, e
Waldir Renato Paradella, aprovada
em 02 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LAKPKL>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Victorino, Heloísa da Silva.

V666a Análise de deformação em pilhas de disposição de estéril (NWI, W e SIV) no complexo minerador de Carajás com uso de dados stripmap do satélite TerraSAR-X / Heloísa da Silva Victorino. – São José dos Campos : INPE, 2016.

xxvi + 118 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.09.15.39-TDI)

Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientador : Dr. Fábio Furlan Gama, e Waldir Renato Paradella.

1. Pilha de disposição de estéril. 2. Interferometria diferencial SAR. 3. Intensity tracking. 4. Província mineral de Carajás. I.Título.

CDU 528.88:520.872(811.5)



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): *Heloísa da Silva Victorino*

Título: " ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO EM PILHAS DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (NWI, W E SIV) NO COMPLEXO MINERADOR DE CARAJÁS COM USO DE DADOS STRIPMAP DO SATÉLITE TERRASAR-X".

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

Dr. Fábio Furlan Gama



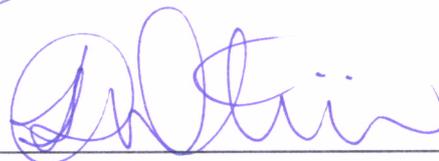
Presidente / Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Jose Claudio Mura



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Cleber Gonzales de Oliveira



Convidado(a) / VISIONA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 02 de Março de 2016

“Quando alguém evolui, evolui também tudo que está à sua volta.”

Paulo Coelho

À minha família, a quem devo tudo o que sou.

AGRADECIMENTOS

Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase da minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por sempre guiar meus passos.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade única de realizar este trabalho de Mestrado com toda a infraestrutura necessária e a companhia de mentes ilustres aqui presentes.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro concedido durante os dois anos de pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Mineradora Vale pelo suporte à pesquisa através do projeto FAPESP-VALE-INPE (Proc. FAPESP 2010/51267-9).

Ao meu orientador, Dr. Waldir Renato Paradella, que abriu as portas para a minha participação neste grupo de pesquisa. Obrigada por fazer questão de aprimorar meu conhecimento e se preocupar com minha carreira.

Ao meu orientador Dr. Fábio Furlan Gama, por todo auxílio, orientação, paciência e diálogo. Enfrentamos muitas dificuldades técnicas, e sem seu suporte eu jamais teria chegado à conclusão deste trabalho. Obrigada por se interessar pela pessoa que eu sou.

Ao Dr. José Claudio Mura, por todo o auxílio nos processamentos e pelas valiosas sugestões.

Ao Dr. Urs Wegmüller da empresa GAMMA-RS AG pelo apoio durante o processamento.

Aos colegas de sala Carol, Guilherme e Filipe pela amizade. A presença de vocês foi indispensável para que isso desse certo.

A todos os meus amigos da turma SERE 2014, em especial Evelyn e Bruna, cuja amizade trouxe alegria aos meus dias.

À turma SERE 2015, que me acolheu como uma de vocês.

À Renata Gaspar, que foi instrutora, confidente, mãe e amiga. Obrigada, Re, pelo ouvido incansável, pelos ombros sempre disponíveis e pelo abraço sempre aberto.

Ao grupo de caminhada e corrida da ADC/INPE, que me mostraram as maravilhas da corrida e da vida, em especial ao Jotta Jr., cuja energia contagia por onde passa.

A todos os outros profissionais maravilhosos que fazem parte da família INPE. Nossas amizades e conversas de corredor tornaram meus dias mais ensolarados.

Ao Dr. Amilton Amorim, por minha introdução à carreira científica, pela amizade, pelo apoio e incentivo para estar aqui e por nunca se ausentar de minha vida.

A minha amiga-alma-gêmea Maiara, que nunca me desamparou, qualquer que fosse a situação. Nossa amizade me faz corajosa.

Ao meu casal favorito Mayara e Rodrigo. A fé de vocês faz com que eu nunca duvide dos planos de Deus.

A minha família: Pai, Mãe, Pri, Paulo. Vocês são minha base e meu porto seguro. Tudo isso só foi possível graças a vocês.

Ao Luiz, pelo companheirismo essencial nos momentos cruciais de finalização deste trabalho. Nossa parceria me fez respirar fundo e continuar.

À incrível São José dos Campos por ter me acolhido, pelos amigos que fiz aqui. A todas as experiências boas e não tão boas que esta cidade me proporcionou. Todas elas construíram um pedaço de mim e hoje fazem parte da minha história.

RESUMO

A Província Mineral de Carajás (PMC) detém a maior mina de ferro a céu aberto do mundo e a melhor qualidade de minério de ferro, bem como grandes depósitos de manganês, cobre, níquel e ouro, sob operação da Vale S.A. Atualmente cinco minas a céu aberto (N4E, N4W, N5E, N5W e N5S) tem a produção anual de milhões de toneladas de minério de ferro. A exploração mineral dá origem a dois tipos de resíduos – os estéreis, compostos por materiais sólidos agregados ao minério e comumente removidos durante a lavra; e os rejeitos, resultantes do processo de beneficiamento do minério. Os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. Após sua remoção são transportados por caminhões e dispostos sob a forma de pilhas em camadas sucessivas. A principal característica das Pilhas de Disposição Estéril (PDEs) são os recalques (assentamentos) sofridos durante e após a operação, que ocorrem devido à reorientação das partículas, alteração por intemperismo, enfraquecimento dos contatos entre partículas e carreamento de material. A possibilidade de ocorrência de acidentes nas PDEs e seus impactos no setor ambiental requerem ferramentas eficientes para o planejamento e prevenção ou minimização de eventuais consequências negativas. A fim de detectar e monitorar possíveis deformações superficiais nas PDEs NWI, W e SIV localizadas na PMC, foram aplicadas duas abordagens de processamento de imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR): uma consolidada na literatura, com precisão centimétrica – Interferometria Diferencial para Séries Temporais (DInSAR-TS), que utiliza interferogramas diferenciais para detectar movimentos na superfície em LoS a partir da informação de fase; e uma mais recente, com precisão métrica – *Intensity Tracking*, que aplica a correlação cruzada bidimensional sobre a imagem amplitude para rastrear alterações na posição dos espalhadores na linha de visada do satélite (*Line of Sight* – LoS) nas direções de range e azimute. Foram utilizadas na investigação 33 imagens TerraSAR-X (TSX-1), adquiridas no modo StripMap, entre 20 de março de 2012 e 20 abril de 2013. Os resultados mostraram que a abordagem DInSAR-TS apresenta-se adequada para esta aplicação, deixando apenas algumas áreas sem monitoramento, que foram em sua totalidade preenchidas pelos resultados da *Intensity Tracking* que, apesar de apresentar menor acurácia, proporciona informações de tendência de comportamento da superfície, proporcionando indícios para averiguação.

Palavras-chave: Pilha de Disposição de Estéril. Interferometria Diferencial SAR. *Intensity Tracking*. Província Mineral de Carajás.

**DISPLACEMENT ANALYSIS OF WASTE PILES (NWI, W AND SIV) IN
CARAJÁS MINERAL
COMPLEX USING TERRASAR-X STRIPMAP DATA**

ABSTRACT

The Carajás Mineral Province (CMP) holds to the largest iron the open sky world and best quality iron ore mine, as well as large deposits of manganese, copper, nickel and gold, under operation of Vale S.A. Currently five mines iron ore in the open (N4E, N4W, N5E, N5W and N5S) have an annual production of millions of tons. Mineral exploration generates two types of residues - waste, composed of solid materials aggregated to the ore and commonly removed during mining; and tailings, resulting from ore beneficiation process. Solid residues are the main responsible for the environmental impact of mining activities. After removed they are transported by trucks and arranged in piles form in successive layers. The main characteristic of Waste Piles (WP) is the settlements during and after operation, which occur due to the reorientation of the particles, change due to weathering, weakening of contact between particles, and carrying of material. The possibility of accidents on WP and their impacts in the environment require efficient tools for planning and preventing or minimizing any adverse impacts. In order to detect and monitor potential surface deformations at NWI, W and SIV waste piles located in CMP, two Synthetic Aperture Radar (SAR) images processing approaches were applied: a consolidated in literature, with centimeter accuracy – Differential Interferometry for *Time-series* (DInSAR-TS), that uses differential interferograms to detect movements on surface from phase information in Line of Sight (LoS); and a more recent, with metric precision – Intensity Tracking, that applies the two-dimensional cross-correlation on the amplitude image to track changes in the position of the scatterers in LoS in range and azimuth directions. 33 TerraSAR-X StripMap images covering the period between March 2012 20th and April 2013 20th were used in the investigation. Results showed that the approach DInSAR-TS is appropriate for this application, leaving only some areas without monitoring, which were entirely filled by the results of Intensity Tracking, despite having lower accuracy, provides the information of surface behavior trend, providing evidences for investigation.

Keywords: Waste Pile. Differential Interferometry SAR. Intensity Tracking. Carajás Mineral Province.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Seção típica de uma pilha de estéril.	12
Figura 2.2 - Classificação dos tipos de PDE.	13
Figura 2.3 - Construção de PDE pelo método ascendente.	15
Figura 2.4 - Construção de PDE pelo método descendente.	16
Figura 2.5 - Otimização de estabilidade em método descendente por <i>wrap-around</i>	17
Figura 2.6 - Sistema de empilhadeira em correia transportadora.....	18
Figura 2.7 - Tipos de ruptura em uma PDE.....	20
Figura 2.8 - Geometria InSAR. Linha de base espacial simultânea (a) e a partir de duas passagens em diferentes momentos (b).....	23
Figura 2.9 - Monte Etna na Itália (a) e seu interferograma correspondente antes (b) e após (c) a remoção da fase da superfície plana.	25
Figura 2.10 - Regiões de alta e baixa coerência interferométrica.	28
Figura 2.11 - Geometria da Interferometria Diferencial SAR.....	30
Figura 2.12 - Fluxograma de desenvolvimento básico da DInSAR no <i>software</i> GAMMA Remote Sensing	32
Figura 2.13 - Fluxograma de desenvolvimento básico da técnica DInSAR-TS no <i>software</i> GAMMA Remote Sensing.....	36
Figura 2.14 – Representação do cálculo de correlação cruzada entre as janelas de busca (em azul) e de referência (em amarelo) e margens de busca (em vermelho) nos eixos vertical e horizontal.....	39
Figura 2.15 - Fluxograma de desenvolvimento básico da técnica <i>Intensity Tracking</i> no <i>software</i> GAMMA Remote Sensing.	41
Figura 3.1 - Localização das minas N4W, N4E e N5W no Complexo Minerador de Carajás, e suas respectivas PDEs NWI, W e SIV e refletor de canto (triângulo em vermelho).....	43
Figura 3.2 - Dados de precipitação referentes ao período de aquisição das imagens TerraSAR-X.	45
Figura 4.1 - Fluxograma das atividades realizadas na pesquisa.....	51

Figura 4.2 - Mapas de deformação DInSAR-TS para período completo (a), seco (b) e chuvoso (c).	54
Figura 4.3 - Perfil AB sobre dados <i>Speckle Tracking</i> (em rosa) para avaliação dos resultados das técnicas DInSAR-TS e <i>Intensity Tracking</i>	56
Figura 4.4 - Pontos de controle para análise dos MDE (em amarelo) sobre pontos referentes ao levantamento topográfico executado em 14/09/2012 (em vermelho).	58
Figura 4.5 - Pontos referentes aos levantamentos topográficos realizados em 31 de agosto (azul) e em 14 de setembro (vermelho) e os selecionados para validação das técnicas (amarelo).....	60
Figura 4.6 - Região de estudo com respectivas áreas que sofreram movimentação antrópica durante todo o período de aquisição das imagens.....	62
Figura 5.1 - Comparação entre coerência interferométrica e linhas de base perpendicular (L_p) dos pares selecionados.....	67
Figura 5.2 – Linhas de base dos pares interferométricos selecionados (em vermelho) e descartados (em verde).....	67
Figura 5.3 - Comparação entre coerência interferométrica sobre as PDEs e índices pluviométricos dos pares selecionados.....	68
Figura 5.4 - Valores de coerência do refletor de canto.....	69
Figura 5.5 - Áreas sem movimentação antrópica sobre as PDEs (em vermelho) entre 20 de março de 2012 e 20 de abril de 2013.....	70
Figura 5.6 - Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS.....	71
Figura 5.7 - Mapa de deformação final para o período seco pela DInSAR-TS.	72
Figura 5.8 - Deformação temporal para o período seco sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.....	73
Figura 5.9 - Mapas de deformação temporal para o período chuvoso pela DInSAR-TS.....	73
Figura 5.10 - Mapa de deformação final para o período chuvoso pela DInSAR-TS.....	74
Figura 5.11 - Deformação temporal para o período chuvoso sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.....	75

Figura 5.12 - Mapas de deformação temporal para o período completo pela DInSAR-TS.....	76
Figura 5.13 - Mapa de deformação final para o período completo pela DInSAR-TS.....	77
Figura 5.14 - Deformação temporal para o período completo sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.....	78
Figura 5.15 - Regiões sobre as PDEs com ausência ou escassez de resultados DInSAR-TS (polígonos em vermelho).....	79
Figura 5.16 - Mapa de deformação em <i>range</i> sobre as PDEs para o par 20120901_20120912 pela <i>Intensity Tracking</i> 64x64 pixels.....	80
Figura 5.17 - Mapa de deformação em azimute sobre as PDEs para o par 20120901_20120912 pela <i>Intensity Tracking</i> 64x64 pixels.....	81
Figura 5.18 - Deformação temporal em <i>range</i> entre março e julho de 2012 sob o ponto P1 pela <i>Intensity Tracking</i> 64x64.	82
Figura 5.19 - Deformação temporal em azimute entre março e julho de 2012 sob o ponto P1 pela <i>Intensity Tracking</i> 64x64.....	82
Figura 5.20 - Resultados de deformação em LoS (cm) do perfil AB para as técnicas aplicadas e <i>Speckle Tracking</i> entre 20 de março e 08 de julho de 2012.....	83
Figura 5.21 - Deformação superficial para o perfil AB para as técnicas aplicadas e <i>Speckle Tracking</i> com intervalos de 11 dias (a), 33 dias (b), 66 dias(c) e 99 dias (d).....	84
Figura 5.22 - Pontos 54 e 118 selecionados a partir da <i>Speckle Tracking</i> (em rosa) sobre área sem movimentação antrópica (amarelo) entre 20 de março e 08 de julho de 2012.	85
Figura 5.23 - Comportamento temporal da altitude do ponto 54 para as técnicas aplicadas e <i>Speckle Tracking</i> entre 20 de março e 08 de julho de 2012.	86
Figura 5.24 - Tendência linear da deformação temporal do ponto 54 para as técnicas aplicadas e <i>Speckle Tracking</i> entre 20 de março e 08 de julho de 2012.....	86
Figura 5.25 - Deformação temporal da altitude do ponto 118 (em metros) para as técnicas aplicadas e <i>Speckle Tracking</i> entre 20 de março e 08 de julho de 2012.....	87

Figura 5.26 - Tendência linear da deformação temporal do ponto 118 para as técnicas aplicadas e <i>Speckle Tracking</i> entre 20 de março e 08 de julho de 2012.....	87
Figura 6.1 - Levantamentos topográficos em 20/03/2012 (vermelho) e 29/03/2012 (verde).....	90
Figura 6.2 - Valores de intensidade máxima ($\times 10^6$) para as imagens de 20 de março a 8 de julho de 2012.....	91

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Imagens de referência para o registro inicial na DInSAR-TS.	52
Tabela 4.2 - Critérios de linha de base para geração de interferogramas e pares interferométricos simulados para cada período.....	53
Tabela 4.3 - RMSE dos interpoladores analisados para determinação do MDE.	58
Tabela 5.1 - Pares interferométricos candidatos para Lp de até a 800 m e Lt de até 45 dias e os selecionados (em destaque).	63
Tabela 5.2 - Coerência média para regiões com ausência ou escassez de medidas DInSAR-TS (com maior valor em destaque) em comparação à resposta do refletor de canto.	68
Tabela 5.3 - Valores de deformação das PDEs para os três conjuntos de imagens.....	78
Tabela 5.4 - Resultados estatísticos amostrais referentes à aplicação do teste de hipóteses Willcoxon entre os dados topográficos e as técnicas aplicadas.	88
Tabela 5.5 - Valores da Raiz do Erro Quadrático Médio das técnicas aplicadas em relação ao dados topográficos.	88

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A-DInSAR	<i>Advanced Differential Synthetic Aperture Radar</i>
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
APP	Área de Preservação Permanente
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
DInSAR	<i>Differential Synthetic Interferometry Aperture Radar</i>
DInSAR-TS	<i>Differential Synthetic Interferometry Aperture Radar Time-series</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EADS	<i>European Aeronautic Defence and Space Company</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ERS	<i>European Remote Sensing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	<i>Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
IPTA	<i>Interferometric Point Target Analysis</i>
IT	<i>Intensity Tracking</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico de Terreno
NBR	Norma Brasileira
NRM	Norma Reguladora de Mineração

PAE	Plano de Aproveitamento Econômico
PDE	Pilha de Disposição de Estéril
PIB	Produto Interno Bruto
PMC	Província Mineral de Carajás
POLIMI	Politecnico di Milano
PS	<i>Persistent Scatterer</i>
PSI	<i>Persistent Scatterer Interferometry</i>
PSInSAR	<i>Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS	<i>Small-Baseline Subset</i>
SIR-C	<i>Spaceborne Imaging Radar C-band</i>
SLC	<i>Single Look Complex</i>
ST	<i>Speckle Tracking</i>
SVD	<i>Single Value Decomposition</i>
TRE	<i>Tele-Rilevamento Europa</i>
UGS	<i>Underground Gas Storage</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ_i	Fase
ϕ_{atm}	Fase atmosférica
ϕ_{orbit}	Fase residual de erro de estimativa de órbita
$\phi_{ruído}$	Fase relativa aos ruídos do sistema
$\Delta\phi_{int}$	Diferença de fase interferométrica
ϕ_{topo}	Fase relativa à topografia
ϕ_{def}	Fase relativa à deformação no terreno
ϕ_{disp}	Fase relativa ao deslocamento
ϕ_{MDE}	Fase relativa ao Modelo Digital de Elevação
$\phi_{\varepsilon_{topo}}$	Fase relativa ao erro de fase topográfica residual
t_1	Tempo
ϕ_{Ob}^T	Vetor de fase desdobrada observada
ϕ_{disp}^T	Vetor de deslocamentos
λ	Comprimento de onda
B	Linha de base
R	Distância entre alvo e sensor
d	Deformação do alvo entre duas aquisições
Δt	Intervalo de tempo
Σ	Somatório
$R(n_i, n_j)$	Correlação
I_i	Imagem
S	Imagem intensidade

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. A produção mineral brasileira	1
1.2. O Complexo Minerador de Carajás.....	2
1.3. Pilhas de Disposição de Estéril.....	3
1.4. Monitoramento de deformações superficiais	4
1.5. Objetivos.....	10
1.6. Estrutura do documento.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1. Pilhas de Disposição de Estéril de mineração	11
2.1.1. Classificação de PDE.....	12
2.1.2. Métodos de disposição de uma PDE	14
2.1.2.1. Método ascendente.....	14
2.1.2.2. Método descendente.....	15
2.1.3. Fatores que afetam a estabilidade de uma PDE	18
2.1.4. Tipos de ruptura	19
2.2. Interferometria.....	22
2.2.1. Fase interferométrica	24
2.2.2. Coerência interferométrica	26
2.2.3. Interferometria Diferencial SAR.....	28
2.2.4. Interferometria Diferencial Avançada	33
2.2.4.1. Interferometria Diferencial por Série Temporal.....	33
2.3. Intensity Tracking.....	37
2.4. TerraSAR-X	42
3 ÁREA DE ESTUDO	43
3.1. Complexo Minerador de Carajás	43
3.1.1. Aspectos climáticos.....	44
3.1.2. Aspectos geológicos	45
4 MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1. Material	49
4.2. Métodos.....	50

4.2.1.	Processamento SAR.....	52
4.2.1.1.	DInSAR <i>Time-series</i>	52
4.2.1.2.	Intensity Tracking.....	54
4.2.2.	Validação.....	55
4.2.3.	Banco de dados.....	62
5	RESULTADOS.....	63
5.1.	Coerência.....	63
5.2.	DInSAR <i>Time-series</i>	69
5.2.1.	Período seco.....	71
5.2.2.	Período chuvoso.....	73
5.2.3.	Período completo.....	75
5.3.	INTENSITY TRACKING.....	78
5.4.	VALIDAÇÃO.....	82
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	89
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
	APÊNDICE A – ORGANIZAÇÃO CRONOLÓGICA DAS ETAPAS.....	115
	APÊNDICE B – GAMMA Remote Sensing.....	117

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por minérios tem exigido a intensificação da atividade mineradora. Esta realidade fez com que as empresas mineradoras buscassem tecnologias capazes de aumentar sua produtividade, minimizando custos de forma a extrair o máximo volume de minério e descartando o mínimo possível de material estéril do solo, mas simultaneamente controlando riscos ambientais e de segurança.

1.1. A produção mineral brasileira

A produção mineral no Brasil encontra-se entre as maiores do mundo, atuando como um dos pilares da sustentação econômica. Na última década o setor de “minérios e concentrados” agregou 232 bilhões de dólares ao conjunto de nossas reservas cambiais. Com sua vasta extensão continental e notável diversidade geológica propícia à existência de jazidas de vários minerais, algumas de classe mundial, o Brasil conquistou posição de destaque no cenário global, tanto em reservas quanto em produção mineral, atingindo no ano de 2014 o valor de US\$ 40 bilhões, cerca de 5% do PIB industrial nacional. No Comércio Exterior, a indústria extrativa mineral contribuiu com mais de US\$ 34 bilhões em exportações de minérios, sendo US\$ 25,8 bilhões referentes somente ao minério de ferro. Entretanto, significativos investimentos precederam tal produção de bens minerais, os quais, para dar continuidade à exploração e ao aproveitamento de novos depósitos minerais, são estimados em US\$ 53,6 bilhões no período compreendido entre 2014 e 2018 (IBRAM, 2015a).

O estado do Pará ocupa o segundo lugar em arrecadação da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais), atrás apenas de Minas Gerais. A exportação de minérios é bastante significativa, representando 70,6% do total de exportações em 2014. Sua balança mineral gerou um saldo de US\$ 9.394,8 bilhões em 2014, cujo valor em 2013 alcançou US\$ 11.824 bilhões. O município de Parauapebas/PA possui grande participação no recolhimento da CFEM paraense, sendo responsável por mais

de 70% do total arrecadado no estado e por 22% do total do Brasil em 2014 (IBRAM, 2015b).

O município de Parauapebas possui uma população estimada em 189.921 habitantes (IBGE, 2015) e é conhecido por localizar-se na maior província mineral do planeta, a Serra dos Carajás. Sua economia ganha destaque no cenário estadual e até mesmo nacional devido à intensa atividade mineradora que ocorre na região. Entre os anos de 2008 e 2011 o Produto Interno Bruto (PIB) de Parauapebas cresceu 144%, enquanto a média nacional ficou em apenas 10%. Em 2013 tornou-se o primeiro município em exportações no Brasil, gerando US\$ 10 bilhões com o aumento na arrecadação tributária decorrente das atividades econômicas geradas a partir da mineração (VALE, 2013).

1.2. O Complexo Minerador de Carajás

Descoberta em 1967, a Província Mineral de Carajás, localizada no município de Parauapebas, abriga a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, contendo ainda grandes depósitos de manganês, cobre, níquel e ouro. Com produção anual de milhões de toneladas de minério de ferro, o complexo localizado no sudeste do Pará tem participação exclusiva da Vale (antiga Companhia Vale do Rio Doce - CVRD) sob concessão do Governo Federal desde 1985, que opera atualmente em cinco minas a céu aberto (N4E, N4W, N5E, N5W e N5S). Além do grande volume de minério de ferro na Província Mineral de Carajás, ele também é considerado o minério de ferro de melhor qualidade do mundo, pela sua pureza média de 67% (VALE, 2015).

Atualmente está em fase de desenvolvimento o projeto Ferro Carajás S11D pela Vale, um empreendimento que se destaca por suas amplas dimensões, e que representará o maior volume de investimento privado no Brasil nesta década, com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento econômico e social nos estados do Pará e do Maranhão, contribuindo, ainda, para a conservação ambiental no bioma amazônico, com novas técnicas de exploração. Este projeto, cujo início operacional está previsto para 2016, visa expandir a atividade de extração e beneficiamento de minério de ferro no Complexo

Minerador de Carajás e pretende injetar na economia US\$ 19,67 bilhões em investimentos, o que representa 26,2% do total de investimentos previstos até 2016 na mineração brasileira e 42,7% do valor a ser aplicado no segmento de minério de ferro, no mesmo período (VALE, 2013).

Neste contexto econômico observa-se a grande importância do investimento na atividade mineradora da região, principalmente no que diz respeito ao seu monitoramento e fiscalização.

1.3. Pilhas de Disposição de Estéril

Após a delimitação do local a ser explorado, a atividade mineradora consiste na retirada do material útil (minério agregado à rocha), posterior partição deste material em dimensões comerciais, limpeza e transporte. No entanto, este procedimento torna-se complexo devido aos vários componentes incorporados ao minério durante a formação da rocha.

A exploração mineral dá origem a dois tipos de resíduos – os estéreis, compostos por materiais sólidos oriundos de uma camada sem valor comercial agregados ao minério e comumente removidos durante a lavra; e os rejeitos, resultantes do processo de beneficiamento do minério, e que contém alto grau de toxicidade, além de partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e reagentes. Os processos de beneficiamento do minério geram uma grande quantidade de rejeito, que é disposto, dependendo dos objetivos econômicos da mineradora, de forma subterrânea ou a céu aberto. As barragens de rejeitos, estruturas que visam reter este tipo de resíduo, representam uma fonte de poluição importante. Sua construção, portanto, deve seguir as normas ambientais e os critérios econômicos, geotécnicos, estruturais, sociais e de segurança e risco (LOZANO, 2006).

Os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. Seu tratamento e armazenamento visando minimizar os custos e maximizar a segurança estão entre os principais objetivos das mineradoras para cumprir as exigências ambientais, já que a disposição dos resíduos gera um custo adicional sem retorno dentro do projeto de mineração. Estéreis são tipicamente representados por solos e rochas de naturezas

diversas, com diferentes granulometrias, densidades e resistências. Após a remoção são comumente transportados por caminhões para serem dispostos sob a forma de pilhas em sucessivos alteamentos (LOZANO, 2006; GOMES, 2012). Sua disposição e a seleção do local dependem da disponibilidade do empreendimento, devendo envolver considerações de impacto econômico, ambiental e de segurança. Sendo esses fatores inter-relacionados, necessita-se de um projeto de pilha de estéril que minimize os custos à mineradora, mas simultaneamente atenda às normas vigentes de segurança e meio ambiente.

A possibilidade de ocorrência de acidentes nessas estruturas e seus impactos no setor ambiental requerem ferramentas eficientes para o planejamento e prevenção ou minimização de possíveis consequências negativas, mantendo o monitoramento dos recursos naturais e da estabilidade superficial por profissionais habilitados.

1.4. Monitoramento de deformações superficiais

Para a construção de pilhas de estéril, é necessário realizar uma avaliação geológico-geotécnica, considerando o local da fundação e os materiais que irão compô-las. Geólogos, engenheiros e técnicos envolvidos nesta avaliação devem estabelecer etapas de investigação para o estabelecimento dos perfis geológico-geotécnicos do terreno de fundação e das pilhas, com avaliação periódica durante todo o processo de construção e vida útil destas estruturas (TEIXEIRA, 2011).

A Norma Reguladora de Mineração para Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos publicada em 2001 pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM - NRM 19/2001) define diretrizes para conformação de estruturas para este fim e estabelece, dentre outras regras, a necessidade da supervisão por profissional habilitado e do monitoramento da percolação de água, da movimentação, da estabilidade e do comprometimento do lençol freático de depósitos de estéril, rejeitos ou produtos e de barragens. Regulamenta ainda que, em situações de risco grave e iminente de ruptura de barragens e taludes, as áreas de risco devem ser evacuadas e isoladas; a evolução do processo deve ser monitorada e todo o pessoal potencialmente afetado deve ser

informado imediatamente, e que para isso, deve haver um plano de contingência adequado.

A NBR 13029, publicada em 2006 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), também estipula normas para instauração de pilhas de disposição estéril em mineração. Em seu item 3.5.9 a norma destaca a necessidade de análise de estabilidade das seções críticas da pilha com relação à altura, características de fundação e condições de percolação, bem como parâmetros de resistência obtidos com os estudos geológico-geotécnicos.

Embora se observe a preocupação de investimento na definição de normas de segurança e na fiscalização da construção de pilhas de estéril, Aragão (2008) comenta que existe uma carência no uso de ferramentas e tecnologias que auxiliem na avaliação do comportamento dos aterros.

O rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração em Mariana (MG) ocorrido em novembro de 2015 ilustra bem este panorama, retratando a importância do monitoramento de estruturas desse tipo. O acidente provocou um prejuízo em infraestruturas estimado pela prefeitura municipal de Mariana em R\$ 100 milhões, causando mortes, desaparecimentos e desabrigados, além de danos ambientais imensuráveis e irreversíveis (PIMENTEL, 2015).

Nessa realidade o Sensoriamento Remoto apresenta-se como uma ferramenta que permite visão sinóptica de grandes extensões da superfície a um custo relativamente baixo, quando comparado aos métodos tradicionais; com possibilidade de imageamento periódico da região para o monitoramento de mudanças na paisagem mineradora. O Radar de Abertura Sintética (SAR) e suas técnicas de aplicação inserem-se convenientemente neste cenário, possibilitando a detecção minuciosa de deformações na superfície, sendo pouco influenciado pela alta concentração de nuvens característica da região norte do Brasil, que limita o uso de produtos orbitais ópticos.

Na abordagem interferométrica (InSAR – *Interferometry SAR*), duas imagens SAR adquiridas a partir de posições ligeiramente diferentes e em momentos distintos, são combinadas para explorar a diferença de fase dos sinais. A fase

interferométrica é sensível à topografia da superfície e ao deslocamento coerente ao longo do vetor de visada entre as aquisições. O uso diferencial de dois interferogramas com características semelhantes permite associar a diferença de fase entre duas imagens SAR a uma deformação superficial ao longo da linha de visada do sensor. A técnica desenvolvida por Gabriel *et al.* (1989), foi empregada pela primeira vez na detecção de deslocamentos superficiais para medir deformações superficiais com acurácia centimétrica e com grande capacidade de cobertura espacial (STROZZI *et al.*, 2002; SANSOSTI *et al.*, 2014).

Segundo Liu *et al.* (2007), a maior vantagem do método interferométrico é que as medições na direção de alcance possuem alta acurácia intrínseca de uma fração do comprimento de onda do sinal de radar. No entanto, em áreas de movimento rápido, a alta taxa de franjas do interferograma pode tornar o desdobramento de fase impossível.

A observação de que a precisão dos resultados obtidos pela Interferometria tradicional era severamente afetada pela atmosfera e pela descorrelação temporal e geométrica levou ao desenvolvimento da segunda geração da tecnologia, a A-DInSAR (Advanced DInSAR), particularmente pelas abordagens DInSAR Time-Series (DInSAR-TS) e Interferometria por espalhadores persistentes (PSInSAR - *Persistent Scatterers InSAR*). A DInSAR-TS gera mapas de deformação através do empilhamento de interferogramas diferenciais formados a partir de imagens *multi-look* em um dado período, de acordo as regras de menor intervalo entre as aquisições ou menor linha de base, com o objetivo de minimizar os efeitos negativos da descorrelação temporal. Já a PSInSAR trata da identificação e acompanhamento de espalhadores pontuais persistentes (PS), pixels que apresentam amplitude estável e fase coerente ao longo do conjunto de imagens. A aplicação de cálculos robustos permite a filtragem dos efeitos atmosféricos e eliminação de erros devido à descorrelação temporal e geométrica (FERRETTI *et al.*, 2000; FERRETTI *et al.*, 2001).

A PSI (FERRETTI *et al.*, 2000) baseia-se em uma série de interferogramas diferenciais, nos quais se busca identificar pixels cujas propriedades de

dispersão variam pouco com o tempo e ângulo de visada, permitindo uma análise temporal da fase interferométrica de pontos individuais, e fornecendo uma informação precisa relacionada com os deslocamentos da superfície em questão. Enquanto o PSI possibilita uma melhor modelagem e diminuição do efeito da fase atmosférica, que está relacionada com a heterogeneidade de atraso no percurso nas aquisições, a DInSAR pode detectar maiores velocidades de deformação e fornece uma informação mais homogênea e extensa relacionada à deformação do solo, ao custo de uma perda na resolução espacial (MURA *et al.*, 2014).

Colesanti *et al.* (2005) utilizaram a abordagem PSI para contornar a dificuldade da DInSAR em investigar a deformação superficial sobre a bacia de mineração de ferro Lorraine, na França, devido à alta descorrelação temporal causada pela densa cobertura de vegetação. A técnica foi aplicada a um conjunto de imagens ERS-1 e ERS-2 de junho de 1995 a abril de 2000 e, embora tenha fornecido pistas valiosas sobre a evolução dinâmica do terreno, a ambiguidade de fase não permitiu a avaliação da amplitude de uma deformação a um nível decimétrico.

Por sua vez, Liu *et al.* (2007) combinaram as técnicas InSAR e *Speckle Tracking* para determinar velocidades de deslocamento de superfície ajustando e correlacionando regiões marginais desconexas em um interferograma através das medições de deslocamento absoluto em alcance a partir do *Speckle Tracking*. A técnica associa a componente de movimento de *range* derivada do método interferométrico e a componente de movimento em azimute derivada do *Speckle Tracking*, gerando um mapa de fluxo bidirecional, sendo particularmente útil para as áreas com uma alta velocidade de movimento e de pares de dados SAR com longa linha de base temporal.

Teatini *et al.* (2010) combinaram resultados de deformação superficial obtidos pela aplicação temporal PSI sobre uma região de armazenamento subterrâneo de gás (UGS - *Underground Gas Storage*) com registros temporais de volumes de gás injetado/removido e pressão de poros por fluido para avaliar o impacto ambiental do UGS a partir de uma visão geomecânica em conexão com a deformação da superfície, que pode causar consequências à integridade de

estruturas e infraestruturas de engenharia. Os resultados obtidos permitiram a calibração de um modelo dinâmico de fluido tridimensional e o desenvolvimento de um modelo geomecânico isotrópico transversal tridimensional, cuja implementação permitiu reproduzir os deslocamentos cíclicos verticais e horizontais na faixa de 8-10 mm e 6-8 mm, respectivamente. As medidas foram realizadas entre 2003 e 2007 sobre o reservatório de gás “Lombardia”, no norte da Itália.

Pinto *et al.* (2014) abordaram a técnica PSI para o monitoramento de deformações sobre o Complexo de Manganês Azul, localizado na Província Mineral de Carajás, alvo de deformações de superfície e movimentos de massa provocados pelas operações regulares de mineração a céu aberto. A técnica apresentou baixa presença de PS sobre a pilha de estéril, inviabilizando a análise de sua deformação, o que indica que a estrutura sofreu intensas mudanças na superfície devido à operação de mineração contínua, expressa pela baixa coerência SAR.

Raspini *et al.* (2014), depararam-se com a necessidade de monitorar a posição e os movimentos do navio italiano Costa Concordia, parcialmente naufragado na região costeira da Toscana (Itália) em janeiro de 2012. Uma vez que, nas imagens COSMO-SkyMed disponíveis, o mar Mediterrâneo separava a embarcação da Ilha Giglio, não foi possível realizar o desdobramento de fase adequadamente para aplicação da técnica InSAR sobre a área na detecção do deslocamento do navio em relação à costa. Assim, a técnica *Speckle Tracking* foi aplicada com sucesso para estimar o movimento dos *patches* localizados no navio e na ilha, permitindo a recuperação do deslocamento diferencial navio-costa. No entanto, enquanto esta era a única solução para estimar o movimento do navio, sua precisão centimétrica não foi considerada suficiente para obter uma estimativa confiável da deformação diferencial sobre o navio, que requeria precisão milimétrica. Foi então aplicada a técnica InSAR sobre a superfície da embarcação para esta finalidade, já que a coerência interferométrica sobre o Costa Concordia indicava a possibilidade de desdobramento de fase. Dessa forma, a combinação das duas técnicas

permitiu dimensionar o deslocamento do navio em relação à região costeira e a deformação diferencial ao longo da embarcação.

Strozzi *et al.* (2002) combinaram as técnicas *Intensity Tracking* (que utiliza imagens de intensidade) e *Coherence Tracking* (que utiliza imagens de coerência) para estimar o movimento superficial de geleiras em Monacobreen, ao norte de Svalbard entre 1992 e 1996, uma vez que este tipo de superfície limita a aplicação de técnicas interferométricas devido à perda de coerência. Verificaram um potencial da *Intensity Tracking* como complemento às tradicionais, destacando sua utilidade exclusiva em alguns casos cujas aquisições de imagens superam intervalos de 24 dias, como é o caso do RADARSAT-1, ENVISAT/ASAR e ALOS/PALSAR-1.

Paradella *et al.* (2015a) aplicaram a técnica SqueeSAR (FERRETTI *et al.*, 2011), que utiliza a abordagem de espalhadores persistentes – PS associados a espalhadores distribuídos – DS para superar os limites da técnica PSInSAR (GAMA *et al.*, 2013), na pilha de estéril NW-1, no Complexo Minerador de Carajás, e obtiveram baixa ocorrência de espalhadores devido à perda de coerência temporal a que este método está sujeito, uma vez que houve neste local intensa atividade operacional. Visando o recobrimento de áreas desse tipo, testou-se o desempenho da técnica *Speckle Tracking* que, embora apresente menor precisão, não requer desdobramento de fase e, portanto, tem maior imunidade à decorrelação temporal. Esta técnica apresentou resultados satisfatórios de recobrimento sobre a pilha em relação à SqueeSAR.

Como se pode observar, as técnicas convencionais de detecção de deformações na superfície com produtos de radar possuem suas vantagens e limitações, que foram testadas em diferentes ambientes. Assim, este trabalho pretende avaliar o potencial da técnica *Intensity Tracking* associada à Interferometria Diferencial por séries temporais (DInSAR Time-Series) para detecção de deformações nos taludes das pilhas de disposição de estéril no Complexo Minerador de Carajás, localizado no município de Parauapebas, no estado do Pará.

1.5. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa de mestrado consiste em verificar a aplicabilidade da técnica Interferometria Diferencial por Séries Temporais (DInSAR-TS) associada à técnica *Intensity Tracking* na detecção de deformações superficiais nos taludes das pilhas de estéril NWI, W e SIV, do Complexo Minerador de Carajás, utilizando as imagens SLC (*Single Look Complex*) SAR adquiridas pelo satélite TerraSAR-X.

Os objetivos específicos consistem em:

- Selecionar, a partir das imagens de coerência interferométrica entre pares candidatos, os melhores conjuntos de imagens para aplicação da técnica DInSAR Time-Series;
- Realizar testes para intervalos temporais e dimensões das janelas de busca que direcionem a determinação do melhor conjunto de dados e parâmetros para orientar a aplicação da técnica *Intensity Tracking*;
- Realizar a comparação dos resultados obtidos com os dados topográficos disponíveis a fim de validá-los qualitativa e quantitativamente avaliando a tendência de deformação das PDEs em estudo.

1.6. Estrutura do documento

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. O Capítulo 1 introduz o tema e justifica a relevância da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão teórica a respeito de pilhas de disposição de estéril, Interferometria e suas técnicas e *Intensity Tracking*. O Capítulo 3 aborda aspectos detalhados sobre da área de estudo. O Capítulo 4 descreve o material e os métodos utilizados para elaboração desta dissertação. No Capítulo 5 apresentam-se os principais resultados obtidos a partir das técnicas empregadas. No Capítulo 6 é realizada uma análise dos resultados alcançados. O Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas e sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Pilhas de Disposição de Estéril de mineração

O mineral a ser explorado normalmente não fica completamente exposto, possuindo alguns pontos de afloramento ou completamente coberto pelo estéril. Proveniente de uma camada de material sem valor comercial, o estéril possui origens distintas, podendo ser fruto da decomposição da rocha sã do próprio minério, ser oriundo de rocha encaixante ou ter origem da sedimentação de materiais distintos, proveniente de outros locais (ALVES, 2009).

A NBR 13029/2006 da ABNT, que trata sobre a elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha, define estéril como qualquer material não aproveitável economicamente, cuja remoção se torna necessária para a lavra do minério.

Os aspectos relativos ao manejo de estéril são ainda mais significativos atualmente, considerando os grandes volumes movimentados nas operações mineradoras, a maior escassez de áreas adequadas à disposição e a intensa fiscalização por parte dos órgãos reguladores. A formação das pilhas de disposição de estéril deve ter projetos específicos, elaborados e acompanhados por profissionais capacitados. Os locais para disposição desses materiais dependem do tipo e origem do estéril, topografia local e aspectos ambientais que são relevantes para obras dessa natureza. No entanto, o fator geral que determina a escolha do local de implantação da pilha é baseado na distância de transporte dos estéreis, que condiciona sua localização em áreas próximas às frentes de lavra, no contexto do próprio domínio geral do empreendimento (PETRONILHO, 2010).

O estabelecimento de uma Pilha de Disposição de Estéril (PDE) passa pelas fases de planejamento e construção. Na fase de planejamento são reunidas todas as informações disponíveis sobre o empreendimento, como possíveis locais para implantação da pilha, suas características geológicas, topográficas, vegetativas, hidrológicas, climáticas; possíveis informações arqueológicas, bem como o tipo, a origem, a quantidade do material a ser disposto e o método a

ser adotado para tal, considerando a minimização de impactos ambientais e socioeconômicos. Já a fase de construção incorpora a preparação da fundação; que visa remover solos orgânicos ou tufosos de modo a favorecer a estabilidade, eliminando uma possível camada entre o terreno de fundação mais resistente e o material da pilha; a drenagem e desvio dos cursos d'água existentes; o controle de água superficial, que objetiva impedir a saturação dos taludes expostos, minimizando erosões superficiais ou desenvolvimento de rupturas por fluxo de água em suas superfícies; o método construtivo, cuja disposição normalmente é realizada pela sobreposição de camadas espessas em plataformas sucessivas; e a operação, que deve ser planejada de modo a aproveitar o máximo possível as condições geomorfológicas do terreno, minimizando a taxa de elevação do aterro e favorecendo sua estabilidade (ARAGÃO, 2008). A Figura 2.1 ilustra a seção típica de uma pilha de estéril.

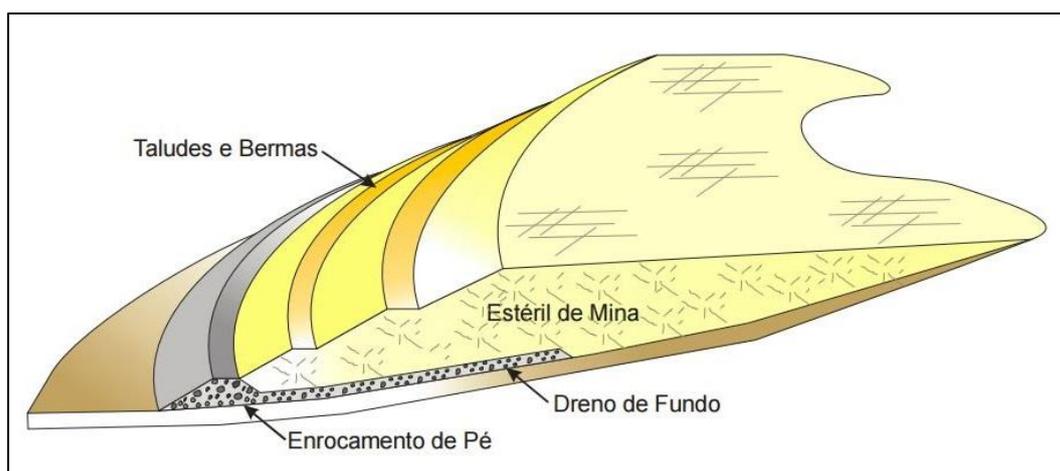


Figura 2.1 - Seção típica de uma pilha de estéril.
Fonte: Gomes (2012).

2.1.1. Classificação de PDE

A literatura oferece algumas formas de classificação para pilhas de estéril quanto a sua estrutura, que de maneira geral depende do tipo de resíduo, da finalidade da estrutura e das limitações físicas do local. Orman *et al.* (2011) categoriza 6 padrões de disposição de estéril de mineração, que podem ser configurados isoladamente ou combinados na estruturação da pilha: *valley-fill*, *cross-valley*, *sidehill*, *ridge* e *diked pond*, apresentadas a seguir e ilustradas na Figura 2.2.

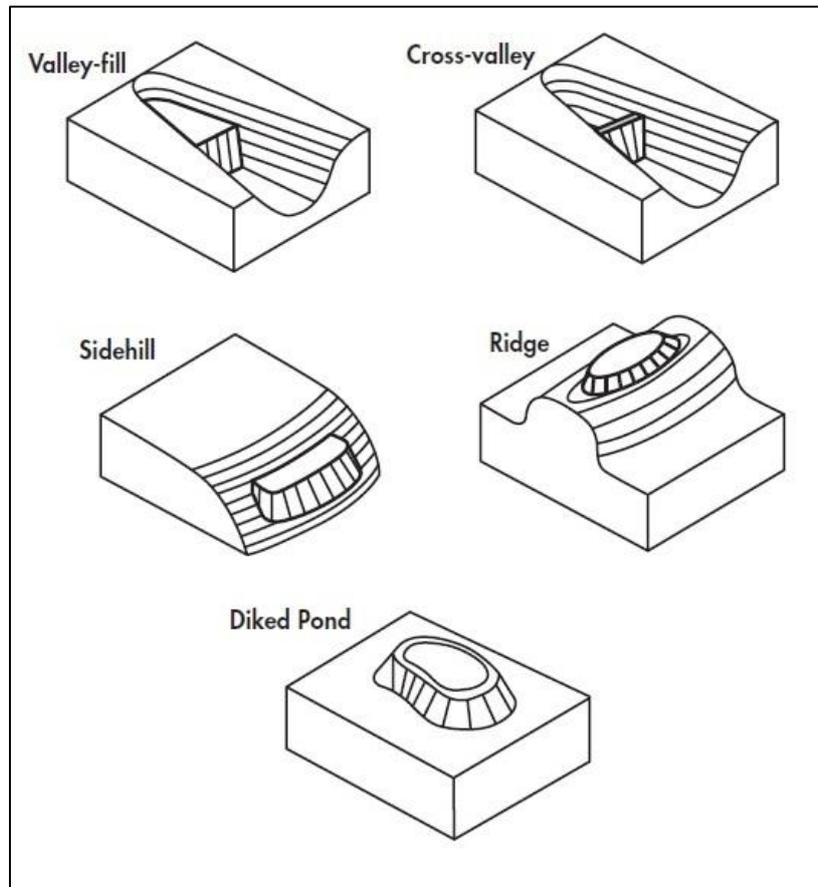


Figura 2.2 - Classificação dos tipos de PDE.
 Fonte: adaptado de Orman et al. (2011).

Uma pilha de estéril do tipo *valley-fill* é estruturada através do preenchimento de um vale. Normalmente inicia-se na porção montante do vale e a disposição de material prossegue ao longo da porção jusante.

Uma estrutura do tipo *cross-valley* cruza o vale, mas não o preenche completamente. A pilha normalmente é estruturada com uma drenagem na parte inferior do vale para controlar o armazenamento e/ou a descarga de águas pluviais, ou um sistema de desvio dessas águas deve ser instalado em um gradiente superior para promover a drenagem.

Uma pilha com configuração *sidehill* é estruturada ao longo do lado de uma encosta, mas não atravessa o fundo do vale. Da mesma forma como na configuração *cross-valley*, este tipo de estrutura também deve ser planejada e construída com canais de desvio ou um sistema de drenagem para armazenamento e/ou descarga de águas pluviais.

Pilhas do tipo *ridge* são posicionadas na crista de um cume, e o material estéril é alocado ao longo de seus dois lados.

A estrutura do tipo *dikedpond* é construída aproximadamente ao nível do terreno. Por definição, é composta por duas partes; um dique de contenção de baixo gradiente e a pilha propriamente dita. Essas duas partes podem ou não estarem isoladas uma da outra por forros (Orman *et al.*, 2011).

2.1.2. Métodos de disposição de uma PDE

De acordo com Petronilho (2010) a disposição de estéril é comumente realizada em camadas espessas, formando uma sucessão de plataformas de lançamento. A estabilidade do aterro pode ser garantida por meio do controle da largura e do comprimento das plataformas e do espaçamento vertical entre elas. Entre as plataformas são deixadas bermas para fins de acesso, que atuam também como estrutura auxiliar na drenagem superficial e no controle de erosão e de suavização do talude geral da pilha. Os métodos de construção de uma pilha de estéril podem ser de dois tipos convencionais – ascendente ou descendente.

2.1.2.1. Método ascendente

No método ascendente, ilustrado na Figura 2.3, cada alteamento sucessivo é suportado pelo anterior, que atua como apoio de superfície plana para o pé do talude do banco e fornece certo confinamento para os solos de fundação, sendo considerado o mais adequado pela robustez da estrutura, pois proporciona uma maior estabilidade, além de permitir o acompanhamento e controle geotécnico ao longo dos sucessivos alteamentos (ARAGÃO, 2008; PETRONILHO, 2010).

Neste método o empilhamento de material estéril é feito de jusante para montante em direção às cabeceiras da bacia de drenagem a partir de um enrocamento de pé. O material é transportado e lançado sobre a plataforma de trabalho, formando pilhas de altura entre dois e três metros; o espalhamento é feito por trator de esteira, compondo camas de espessura entre um metro e um

metro e meio, cuja compactação é executada pelo próprio tráfego de veículos. Assim, são formadas bancadas e bermas de dez a quinze metros de altura e posterior retaludamento com trator de esteira, sendo a camada superficial regularizada e estabilizada por compactação final. Ao final de cada etapa são implantados dispositivos de drenagem e de proteção superficial dos taludes concluídos (PETRONILHO, 2010).

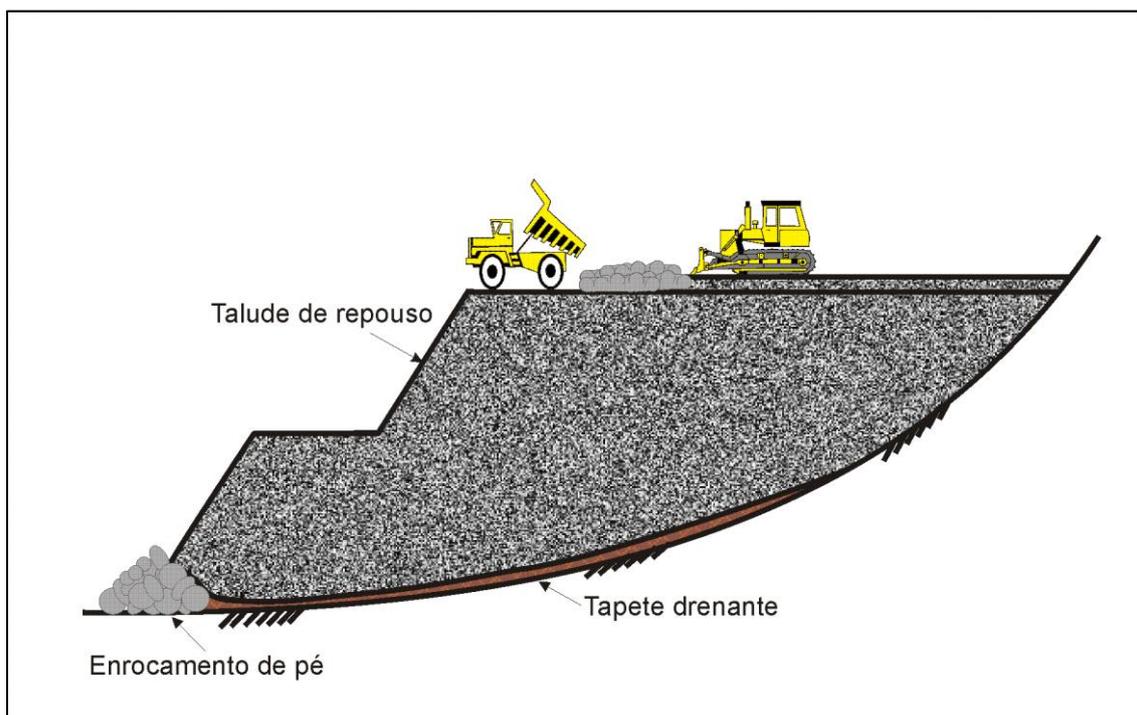


Figura 2.3 - Construção de PDE pelo método ascendente.
Fonte: adaptado de Aragão (2008).

2.1.2.2. Método descendente

O método descendente, representado na Figura 2.4, é tipicamente o mais econômico para construir uma pilha de estéril, uma vez que não é necessário realizar o transporte de material em aclive (EPA, 1995). Nele, cada camada posterior é suportada no pé do talude anterior pelo depósito direto do material estéril a partir da cota mais elevada dos taludes da pilha, construída já em sua altura máxima. Este método compromete a estabilidade da estrutura, uma vez que são as condições de fundação e os taludes do terreno natural ao pé da PDE que a condicionam.

A compactação do material é efetuada pelo tráfego de equipamentos e os taludes evoluem com a dinâmica do empilhamento, impedindo procedimentos de cobertura vegetal ou de proteção superficial de taludes. Devido à alta instabilidade de pilhas construídas através deste método, que a faz susceptível a erosões e escorregamentos generalizados, sua aplicação é bastante restrita, sendo indicada apenas para materiais fracamente drenantes ou em áreas confinadas (ARAGÃO, 2008; PETRONILHO, 2010).

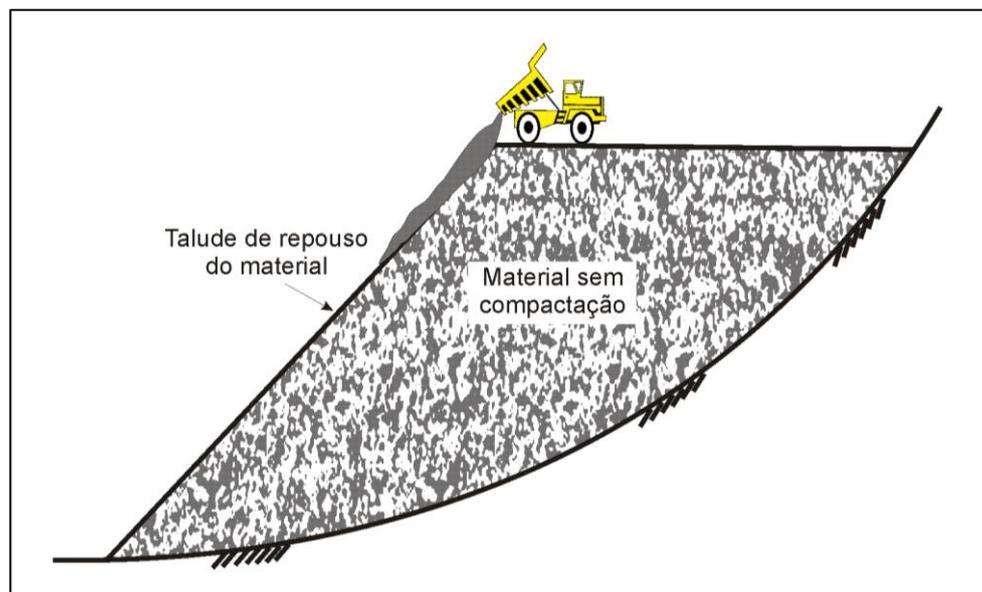


Figura 2.4 - Construção de PDE pelo método descendente.
Fonte: adaptado de Aragão (2008).

Uma opção de otimização que proporciona uma significativa melhora na estabilidade de pilhas deste tipo é o uso de *wrap-arounds*, que consiste em executar a expansão do aterro inicial com outro aterro descendente em elevação inferior (similar a um banco) que atua como contraforte do aterro anterior, como ilustra a Figura 2.5 (EPA, 1995).

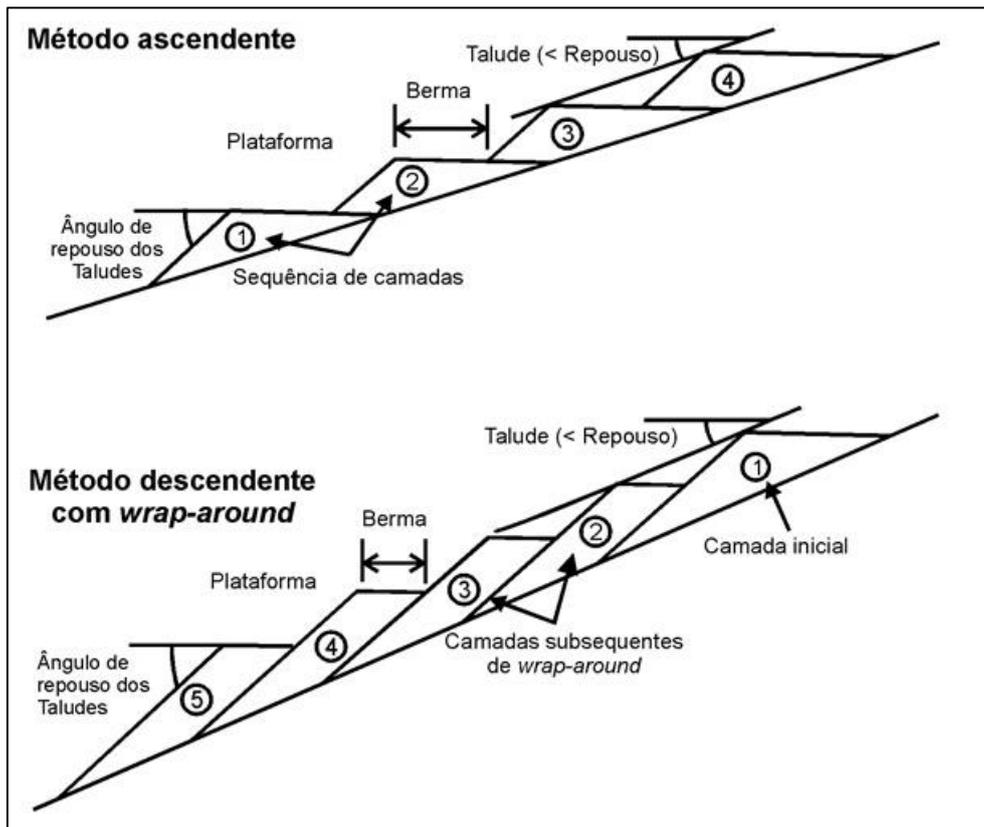


Figura 2.5 - Otimização de estabilidade em método descendente por *wrap-around*.
 Fonte: adaptado de EPA (1995).

Um método alternativo a estas duas configurações de empilhamento é o transporte do material estéril por correias transportadoras através de empilhadeiras (Figura 2.6). Neste método também não há compactação dos taludes, uma vez que não há tráfego de equipamentos sobre a superfície. A vantagem na obtenção de uma maior velocidade de alteamento que os demais e conseqüente menor perda de umidade do estéril é conflitante com a limitação da dissipação das poropressões da fundação. Assim, encontra-se em processo de aprofundamento de estudos, sendo mais utilizado para o transporte e estocagem de minérios e menos para o de estéreis (PETRONILHO, 2010; MORRO DO PILAR MINERAIS S.A., 2012).



Figura 2.6 - Sistema de empilhadeira em correia transportadora.
Fonte: Vale (2015).

2.1.3. Fatores que afetam a estabilidade de uma PDE

A análise da estabilidade de uma PDE é uma das operações mais importantes a serem executadas em um projeto de mineração, e deve ser realizada em todas as suas fases, desde o planejamento até a desativação. Esta avaliação é realizada a partir dos dados coletados em estudos preliminares e durante sua construção. Nela são levantadas hipóteses de ruptura para as diversas situações das pilhas, e devem ser considerados elementos fundamentais que condicionam a estabilidade da PDE. Dentre os citados por Orman *et al.* (2011), vale ressaltar:

- Local de instalação, cuja seleção é comumente realizada de modo a minimizar a distância entre a área de lavra e a disposição de estéreis;
- Geometria da pilha, que depende do método de disposição de estéril e da topografia do local;
- Propriedades geotécnicas do material estéril e da fundação, que incorporam densidade, saturação, força de cisalhamento, permeabilidade e índice de compressão;

A principal característica das pilhas de estéril são os recalques (assentamentos) sofridos durante e após a operação. Eles ocorrem devido à reorientação das partículas, alteração por intemperismo, enfraquecimento dos contatos entre partículas, e carreamento de material. A taxa de recalque depende da altura da pilha, dos carregamentos, da localização na pilha, do tipo

de material e da presença de água. A maior parte dá-se durante a construção. Sob condições secas, recalques de 0,3 a 7% da altura da pilha são típicos, mas recalques totais de mais de 20% já foram documentados (ORMAN *et al.* 2011). Os efeitos de consolidação e compactação das pilhas de estéril podem ainda estender-se por até 10 anos após sua desativação.

2.1.4. Tipos de ruptura

Diversos modos de ruptura podem ocorrer em taludes de pilhas de estéril, como ilustra a Figura 2.7. Deslizamentos de superfície ou borda ocorrem com o material deslocando-se encosta abaixo. Escorregamentos por fluxo superficial podem ocorrer se uma quantidade suficiente de água entra na encosta e flui paralelamente à face. Pilhas de estéril localizadas em terrenos planos de solo resistente são menos propensas à ruptura; no entanto, se o terreno plano é coberto por uma fina camada de material instável ou se o terreno é inclinado, a probabilidade de ocorrer ruptura da base é maior. Rupturas do tipo translação de bloco são de ocorrência mais provável em pilhas construídas sobre terrenos inclinados cuja cobertura é relativamente fina e rúptil; lençóis freáticos anormalmente elevados no aterro, terremotos ou deposição de matéria orgânica sob a pilha pode favorecer seu início. Ruptura por arco circular do material estéril ocorre com maior probabilidade em locais em que a pilha é estruturada sobre uma fundação adequada e o material estéril contém uma porcentagem significativa de solo de granulosidade fina. Similarmente, uma ruptura de fundação circular pode se desenvolver através de uma fundação profunda formada por solo de granulosidade fina. Espalhamento de base tem seu início quando o material da base da borda exterior da pilha cede, o que muitas vezes indica o início do rompimento da base ou a translação da pilha (CALDWELL *et al.*, 1981).

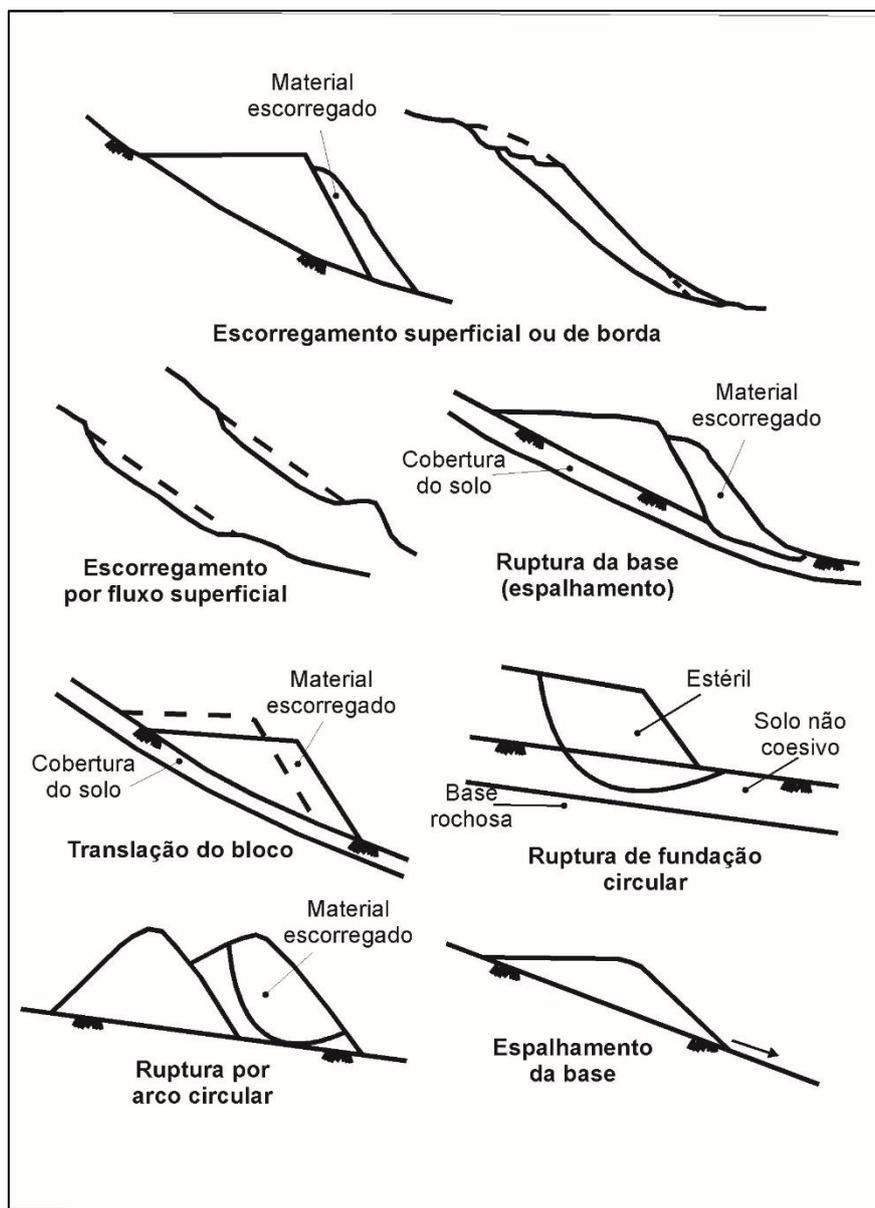


Figura 2.7 - Tipos de ruptura em uma PDE.

Fonte: adaptado de Caldwell *et al.* (1981).

Santos *et al.* (2015), citando a DNPM/NRM 19/2001 e a ABNT/NBR 13.029 destaca algumas regulamentações e recomendações importantes no planejamento e construção de pilhas, que visam promover a segurança do empreendimento minerador e minimização de impactos ambientais. São elas:

- altura máxima de bancos de 10 m;
- largura mínima de bermas de 6 m;
- altura máxima da pilha de 200 m;
- ângulo de taludes inferior ao ângulo de repouso do material;

- ângulo mínimo de inclinação longitudinal das bermas de 1% e transversal de 5%;
- leiras nas cristas dos bancos.
- sistema de retenção de sedimentos oriundos da erosão;
- execução da pilha de forma ascendente;
- disposição do material o mais próximo possível da cava, se possível, dentro da mesma ou em áreas já impactadas;
- evitamento de disposição de material em vales com inclinação superior a 18°, áreas de preservação permanente (APP), terrenos instáveis, áreas com vegetação nativa exuberante, áreas com solo fértil;
- fator de segurança para condições normais de superfície freática de 1,5;
- fator de segurança para taludes entre bermas de 1,5;
- largura das bermas suficiente para atender às considerações de drenagem e garantir acesso de equipamentos de manutenção com segurança;
- aplicação de revestimento superficial (vegetação) em bermas, plataformas e taludes;
- previsão de disposição de estéril, rejeitos e produtos no Plano de Aproveitamento Econômico – PAE;
- estudos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos preliminares à construção de depósitos de estéril, rejeitos e produtos;
- planejamento e implantação dos depósitos de estéril, rejeitos, produtos, barragens, áreas de armazenamento e bacias de decantação por profissional legalmente habilitado, atendendo às normas em vigor;
- estocagem definitiva ou temporária de estéril e materiais diversos provenientes da mineração realizada com o máximo de segurança e o mínimo de impacto ambiental;

- proibição de estabelecimento de quaisquer edificações, exceto edificações operacionais, dentro dos limites de segurança das pilhas enquanto as áreas não forem recuperadas, a menos que as pilhas tenham estabilidade comprovada;
- construção de canais periféricos a fim de desviar a drenagem natural da água da pilha.

Mesmo com os avanços tecnológicos na exploração de minério de ferro, os volumes de material estéril gerados no processo de lavra crescem a cada ano, juntamente ao crescimento da produção mineral, o que exige áreas cada vez maiores para sua disposição, já que afeta diretamente a lavra. Simultaneamente aumentam-se as dificuldades em viabilizar áreas para este fim, devido às exigências ambientais, comunidades próximas, alto custo das terras, localização geográfica, relevo, teores de ferro cada vez menores, entre outros.

Diante deste quadro, tem sido cada vez mais necessária a realização de projetos sustentáveis, conciliando a necessidade exploratória com a preservação ambiental, o que requer um grande esforço na busca por novas tecnologias e estudos de engenharia mais refinados para a viabilização de novas pilhas de estéril.

2.2. Interferometria

A técnica de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) é utilizada para medir a superfície topográfica e suas mudanças no tempo. Como princípio básico utiliza o fenômeno de interferência de duas ondas eletromagnéticas para medir distâncias através da diferença de fase entre essas ondas, devida em sua maior parte à diferença na distância percorrida por cada onda. Essas aquisições podem ser realizadas a partir de uma simples passagem (linha de base puramente espacial), na qual duas antenas receptoras do sinal proveniente da superfície estejam separadas por linha de base B e não havendo diferença temporal entre elas, ou a partir de duas passagens consecutivas (linha de base temporal) ocorrendo, assim, uma defasagem temporal. Em ambos os casos, O interferograma é determinado pelo corregristo

de duas imagens complexas SAR e multiplicando uma pelo complexo conjugado da outra (WEGMULLER e WERNER, 1995; MADSEN e ZEBKER, 1998; MURA, 2000 e GABOARDI, 2003).

Em aquisições com linha de base (B) exclusivamente espacial (Figura 2.8 (a)) um alvo é imageado a partir de duas trajetórias SAR simultâneas. A medição básica consiste em estimar a altura do alvo a partir das posições conhecidas da plataforma e das distâncias percorridas pela onda entre o alvo e as antenas, o que proporciona a determinação da topografia do terreno. Entre as vantagens desta abordagem pode-se citar a baixa decorrelação temporal e o conhecimento da dimensão da linha de base. No entanto, devido à dificuldade de viabilizar esta geometria no espaço, utiliza-se duas aquisições a partir de trajetórias repetidas em momentos distintos. Nesta situação, ocorre o efeito de decorrelação temporal e há necessidade de estimar a linha de base (MADSEN e ZEBKER, 1998; KUMAR, 2011). No entanto, aquisições orbitais frequentemente incorporam a combinação dessas duas abordagens para aplicações que envolvam dinamicidade da paisagem e topografia, de modo a garantir a diferença de fase entre as aquisições (Figura 2.8 (b)).

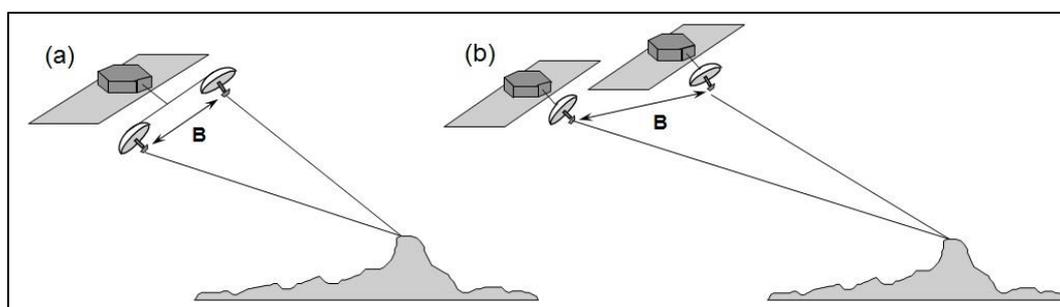


Figura 2.8 - Geometria InSAR. Linha de base espacial simultânea (a) e a partir de duas passagens em diferentes momentos (b).
Fonte: adaptado de Paradella (2015b).

Matematicamente a sensibilidade do sistema InSAR varia proporcionalmente ao tamanho da linha de base normal. No entanto, seu aumento implica em uma maior decorrelação espacial, uma vez que as visadas das duas aquisições diferem na mesma proporção. Dessa forma os sistemas InSAR devem buscar o equilíbrio e entre uma boa sensibilidade e uma baixa decorrelação espacial (MURA, 2011).

A aplicação da Interferometria SAR exige que primeiramente seja realizado um registro bastante preciso entre as imagens, a fim de minimizar os ruídos a partir da correção de eventuais distorções, gerando assim, um interferograma de melhor qualidade.

2.2.1. Fase interferométrica

A radiação transmitida pelo radar tem que atingir os espalhadores na superfície e então retornar ao sensor para formar a imagem SAR. Espalhadores em diferentes distâncias do radar introduzem um atraso entre a transmissão e a recepção da radiação. Devido à natureza oscilatória do sinal, este atraso causa uma mudança de fase entre os sinais transmitidos e recebidos. A mudança de fase é, assim, proporcional à distância dupla (ida e volta) percorrida pela onda dividida pelo comprimento de onda transmitida (ESA, 2007). A partir de técnicas de processamento, a intensidade e a fase do sinal de retroespalhamento de cada célula de resolução do solo podem ser calculadas na forma de uma imagem de valor complexo (ULABY, 1982; GAMA *et al.*, 2013). A exploração da informação de fase interferométrica requer o conhecimento acerca da posição do sensor no momento das aquisições, para que seja possível reconstruir a geometria do sistema SAR naquele instante (RAMOS, 2013).

A diferença de fase entre pixels análogos em duas imagens SAR é denominada interferograma e está relacionada com a elevação do terreno. A geração do Modelo Numérico de Terreno (MNT) a partir do interferograma exige a remoção de seu padrão cíclico, cujo processo é intitulado desdobramento de fase (MURA, 2001). A diferença de fase entre pixels de posições correspondentes nas duas imagens está relacionada à diferença de distância entre as duas trajetórias durante as aquisições; ao comprimento da linha de base; à altura do alvo na superfície e ao comprimento de onda do sistema sensor. Está ainda presente no interferograma uma componente que expressa o ruído da fase cujas fontes são: descorrelação devido à linha de base (causada por diferentes ângulos de aquisição); descorrelação temporal (ocorrente em interferometria de duas passagens); erro no registro das

imagens; ruído térmico; ruído *speckle* e erros introduzidos pelo processamento SAR (MURA, 2011).

De acordo com Wegmuller e Werner (1995); Mura (2000) e Gaboardi (2003), algumas etapas básicas estruturam o processo interferométrico. Primeiramente efetua-se o registro entre o par de imagens complexas, que deve ser bastante rigoroso, uma vez que a precisão obtida neste passo determinará a qualidade da fase interferométrica. Posteriormente realiza-se a geração da imagem interferométrica a partir da multiplicação da imagem complexa pelo seu conjugado registrado. O interferograma, então, é obtido através da diferença de fase da observação de um alvo de dois pontos distintos. Ele apresenta padrões do tipo franjas, decorrentes do caráter cíclico da fase de 2π , e um ruído próprio, que é reduzido após a aplicação de um filtro espacial. Em seguida é gerada a imagem de coerência, que resulta da estimação do módulo da correlação complexa entre as duas imagens que originaram o interferograma. A fase da superfície plana, que consiste na diferença de fase devida à observação de uma superfície plana a partir de dois pontos distintos é então removida (Figura 2.9), uma vez que não está associada a nenhuma informação topográfica. O interferograma, então, contém a informação de fase que é diretamente relacionada à topografia. Essa fase, modulada em ciclos de 2π possui um problema de ambiguidade no cálculo do correto número inteiro de ciclos que precisam ser adicionados para cada medida de fase, cuja solução é denominada desdobramento da fase e constitui a etapa mais complexa no processamento InSAR.

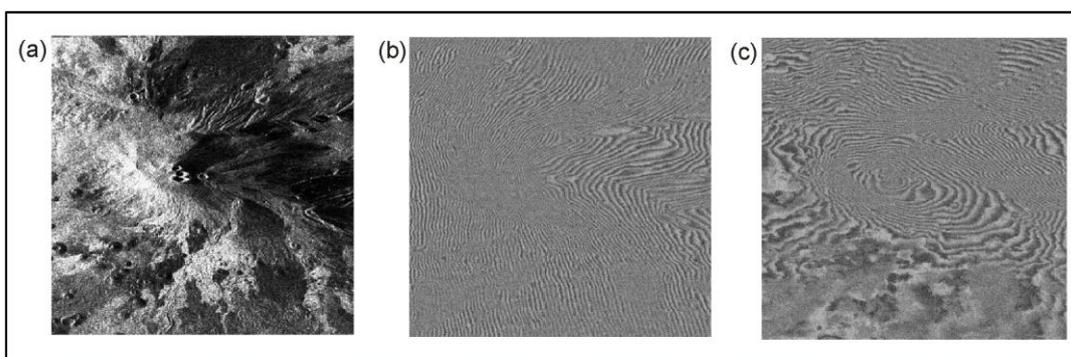


Figura 2.9 - Monte Etna na Itália (a) e seu interferograma correspondente antes (b) e após (c) a remoção da fase da superfície plana.
Fonte: adaptado de Bins (2014).

Após a etapa de desdobramento de fase é necessário determinar a fase absoluta necessária para a geração de um Modelo Digital de Elevação e posterior geocodificação ou prosseguir com a abordagem diferencial para interferometria.

2.2.2. Coerência interferométrica

Em uma situação ideal de interferometria SAR, a diferença de fase obtida está relacionada com a diferença de percurso do sinal. No entanto, ruídos relacionados ao sistema e à interação radar-alvo alteram a fase da onda e degradam a qualidade do interferograma, cuja dimensionalidade se dá pelo grau de coerência entre as aquisições.

A imagem de coerência é calculada através do coeficiente de correlação complexo entre duas imagens interferométricas e está relacionada ao desvio-padrão da fase interferométrica. Assim, valores de coerência altos demonstram estabilidade das fases devidas aos espalhadores, o que representa uma similaridade dos espalhamentos. A perda de coerência entre duas aquisições, denominada descorrelação, pode ser atribuída a três fatores principais: ruídos (predominantes nas situações de baixo sinal de retorno), espacial (causada pela linha de base) e temporal (ocorrente em aplicações de interferometria de duas passagens).

Das diversas limitações de sucesso da aplicação da técnica InSAR, a mais severa é a descorrelação temporal, que pode ser causada por qualquer mudança temporal dentro de um elemento de resolução, como crescimento ou mesmo movimento da vegetação, erosão, colheita, subsidência, etc., e provoca o deslocamento não-coerente dos dispersores, alterando a fase e causando uma perda de coerência entre as aquisições (NIEVINSKI, 2004).

Uma imagem de coerência normalmente tem a magnitude de seus pixels estabelecida entre 0 e 1. Valores de coerência próximos de zero representam uma baixa correlação entre pixels análogos nas duas imagens. O oposto ocorre com valores próximos de 1.

A aplicação da Interferometria SAR exige uma coerência elevada, isto é, as características da energia retroespalhada a partir do alvo na superfície devem ser semelhantes nas duas passagens da antena pelo mesmo local. Deste modo, a imagem de coerência permitirá avaliar se as duas imagens SAR são apropriadas para o processamento interferométrico, ou seja, se existe correlação suficiente entre as imagens para gerar um interferograma de qualidade. Três situações podem ser derivadas da análise de uma imagem de coerência: valores entre 0 e 0,2 indicam imagens que não constituem informação útil para a geração do interferograma; valores entre 0,2 e 0,5 apontam imagens que podem ser utilizadas para geração de interferograma, no entanto com alta presença de ruídos; e valores de coerência superiores a 0,5 revelam uma alta qualidade do interferograma, recomendada para a estimativa de altitudes (REBELO, 2007).

Imagens de coerência são facilmente interpretáveis; regiões bastante iluminadas, com níveis de cinza próximos do branco, apresentam elevada correlação do par; enquanto regiões escuras, com tonalidades próximas do preto indicam regiões pouco correlacionadas, ou seja, com baixa coerência e, portanto, impróprias para aplicação de técnicas interferométricas. Essas situações são ilustradas na Figura 2.10.

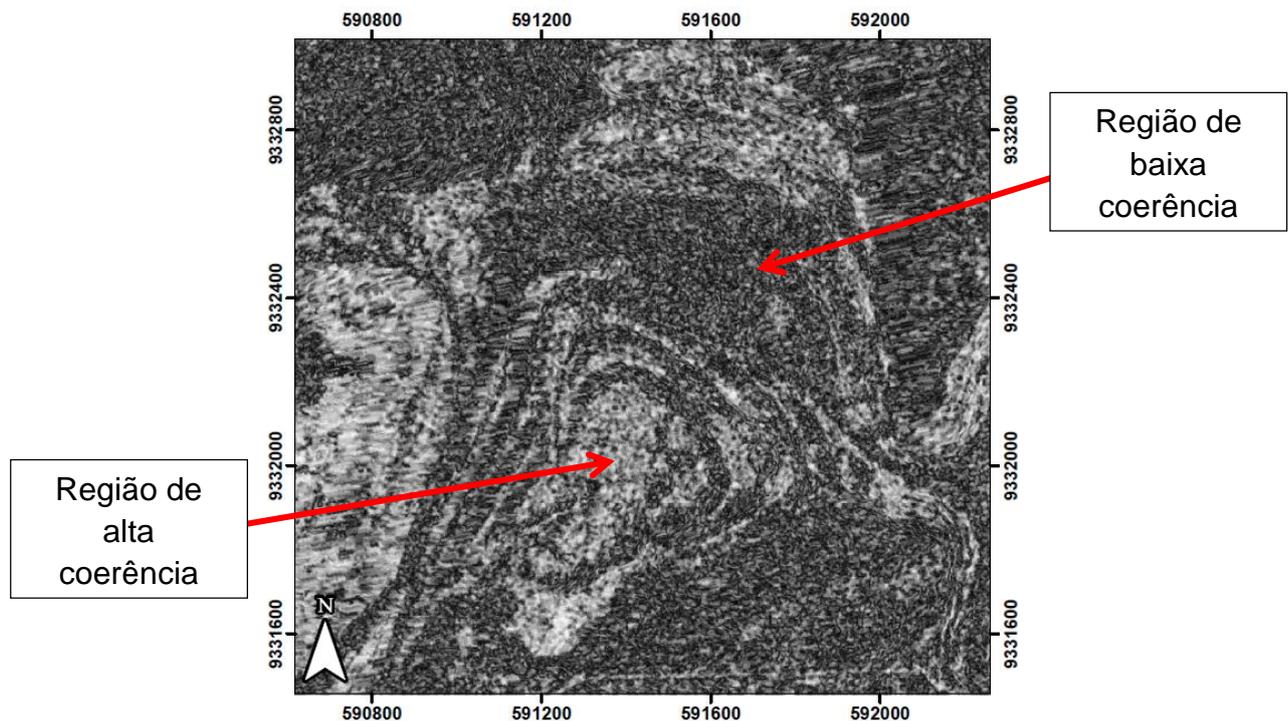


Figura 2.10 - Regiões de alta e baixa coerência interferométrica.

Imagens de coerência podem ser utilizadas para proporcionar a seleção de imagens mais adequadas à aplicação de técnicas interferométricas; principalmente em paisagens cuja descorrelação temporal é favorecida como, por exemplo, áreas cercadas por florestas e sujeitas a intempéries e mudanças superficiais frequentes e intensas; como observado no contexto de trabalho de Mura *et al*, 2015. Tal abordagem também é aplicada neste trabalho de dissertação, visando selecionar pares de imagens que tenham sua coerência maximizada, uma vez que a região de estudo apresenta as características mencionadas.

2.2.3. Interferometria Diferencial SAR

A Interferometria Diferencial SAR (DInSAR) baseia-se no cálculo, numa base pixel-a-pixel, da diferença de fase entre dois interferogramas para detectar alterações na superfície. Assumindo que a refletividade do alvo e o comportamento da atmosfera são constantes sob duas aquisições, e que o ruído do sistema é desprezível, os valores de fase de um interferograma serão proporcionais ao deslocamento do alvo entre as duas aquisições.

A fase ϕ_1 de um alvo observado no instante t_1 pode ser determinada pela equação (2.1) (MURA, 2013):

$$\phi_1 = \frac{4\pi R_1}{\lambda} + \phi_{atm1} + \phi_{orbit} + \phi_{ruído1} \quad (2.1)$$

Onde R_1 representa a distância entre o alvo e o sensor, λ é o comprimento de onda do sistema operante, ϕ_{atm1} refere-se à componente atmosférica no instante t_1 , ϕ_{orbit} a fase residual de erro na estimativa de órbita e $\phi_{ruído}$ indica ruídos relativos ao sistema. Analogamente, para um instante t_2 tem-se (2.2):

$$\phi_2 = \frac{4\pi R_2}{\lambda} + \phi_{atm2} + \phi_{orbit} + \phi_{ruído2} \quad (2.2)$$

Dessa forma, assumindo o comportamento da atmosfera, o erro na estimativa de órbita e os ruídos do sistema constantes nas duas aquisições, a diferença de fase interferométrica $\Delta\phi_{int}$ é expressa por (2.3) e (2.4):

$$\Delta\phi_{int} = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.3)$$

$$\Delta\phi_{int} = \frac{4\pi(R_1 - R_2 - d)}{\lambda} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + \phi_{ruído} \quad (2.4)$$

Em que d representa a deformação do alvo entre as duas aquisições, cuja situação é ilustrada na Figura 2.11.

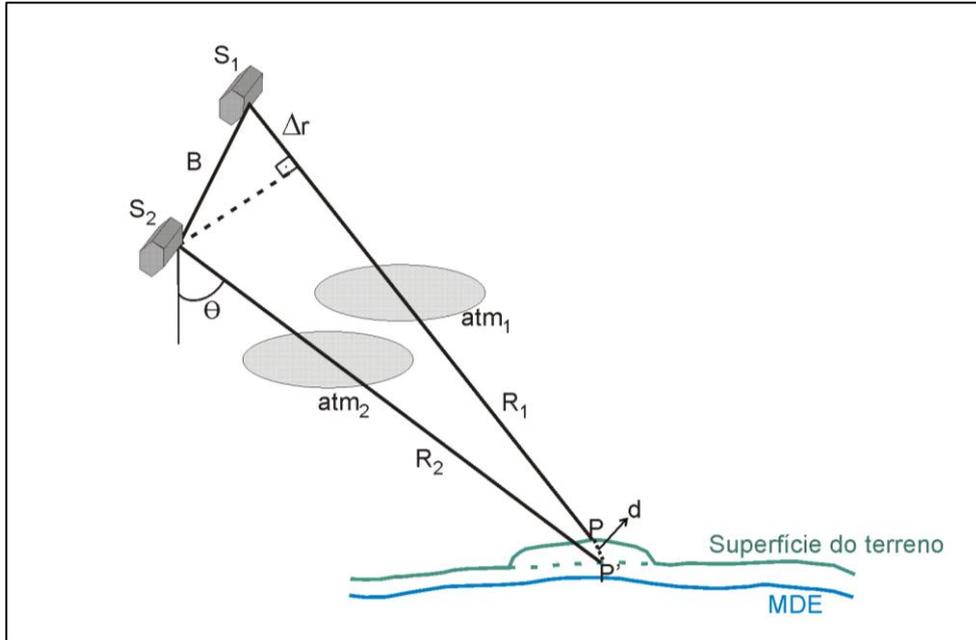


Figura 2.11 - Geometria da Interferometria Diferencial SAR.

Assim,

$$\Delta\phi_{int} = \phi_{topo} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + \phi_{ruído} \quad (2.5)$$

A equação (2.5) expressa as componentes de fase interferométrica observada ($\Delta\phi_{int}$) nas duas imagens, sendo ϕ_{topo} a componente referente à topografia; ϕ_{def} a componente referente à deformação no terreno entre as duas aquisições, na qual se está interessado; ϕ_{atm} a componente atmosférica, ϕ_{orbit} a fase residual de erro na estimativa de órbita e $\phi_{ruído}$ a componente relacionada ao ruído.

A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) referente às datas das imagens pode-se simular a fase do terreno e então remover essa componente da fase interferométrica. No entanto, a fase do MDE (ϕ_{MDE}) incorpora um pequeno erro de fase topográfica residual ($\phi_{\varepsilon_{topo}}$), que deve ser removido.

Dessa forma tem-se:

$$D\phi_{int} = \Delta\phi_{int} - \phi_{MDE} \quad (2.6)$$

$$\phi_{\varepsilon_{topo}} = \phi_{topo} - \phi_{MDE} \quad (2.7)$$

$$D\phi_{int} = \phi_{def} + \phi_{\varepsilon_{topo}} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + \phi_{ruído} \quad (2.8)$$

Em que $D\phi_{int}$ é a informação de deformação que pode ser estimada a partir de ϕ_{def} , que, entretanto, incorpora as demais fases residuais não removidas.

A DInSAR, assim, possibilita a determinação de deformações no terreno para pares de imagens que apresentem elevada coerência entre si, fazendo com que a decorrelação temporal seja um fator limitante para a aplicação da técnica, da mesma forma que não há possibilidade de modelagem para a componente de atraso da atmosfera. Sua acurácia é da ordem de centímetros, favorecendo a detecção de deformações significativas, uma vez que deformações de baixa magnitude podem ser atenuadas pelos ruídos.

A Figura 2.12 apresenta o fluxograma de desenvolvimento da técnica DInSAR no *software* GAMMA Remote Sensing.

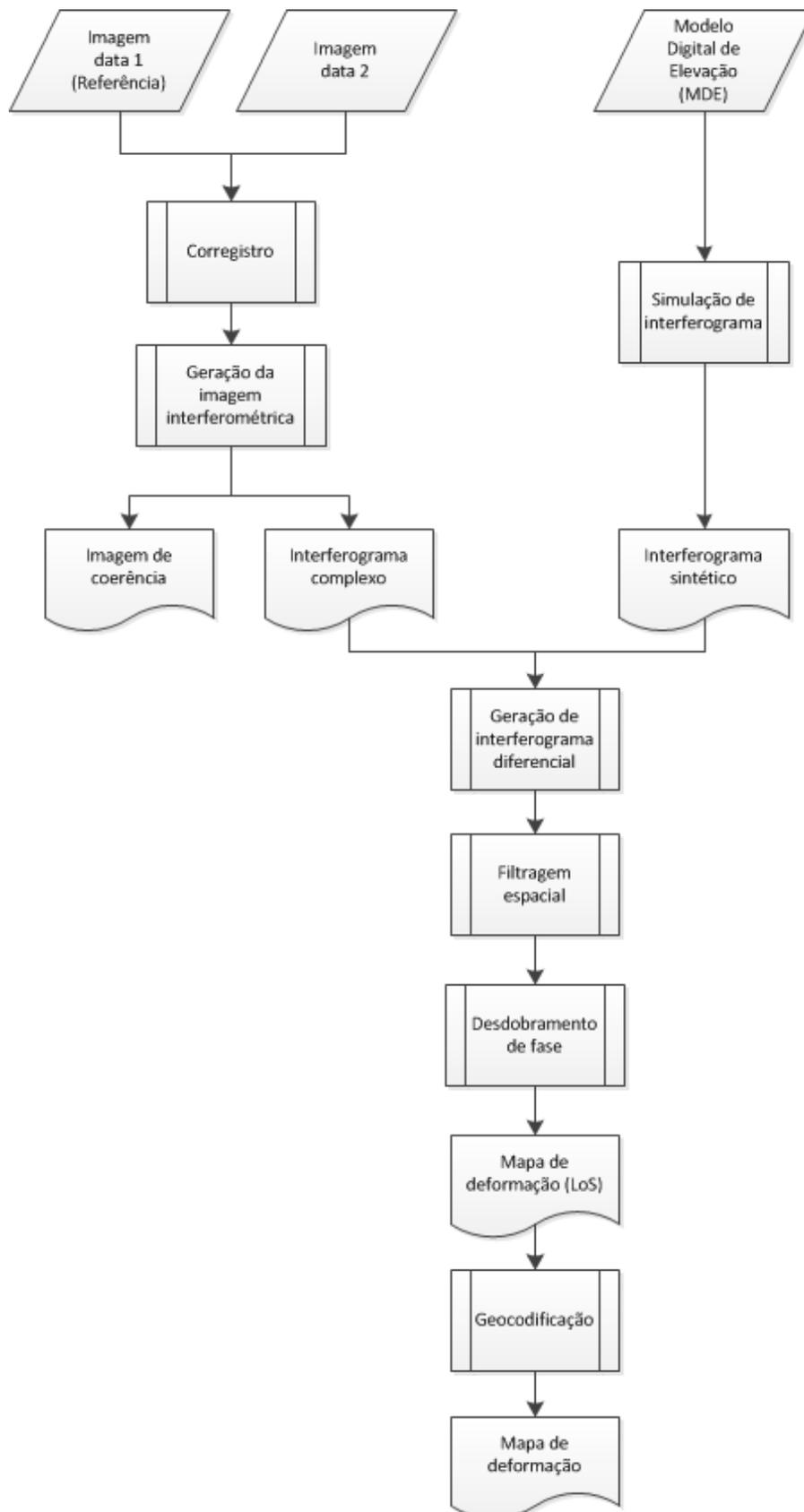


Figura 2.12 - Fluxograma de desenvolvimento básico da DInSAR no *software* GAMMA Remote Sensing

2.2.4. Interferometria Diferencial Avançada

A Interferometria Diferencial SAR aplicada sobre áreas extensas é fortemente prejudicada pela influência da atmosfera na fase interferométrica. A fim de contornar as limitações desta técnica tradicional, foram propostas técnicas avançadas – A-DInSAR, particularmente destacada pelas abordagens SBAS, DInSAR-TS, e PSI (FERRETTI *et al.*, 2000; FERRETTI *et al.*, 2001), que atualmente são poderosas ferramentas para o monitoramento dos fenômenos de deformação da superfície, com uma precisão de centímetros ou sub-centímetros utilizando sensores nas bandas C e X, e de alguns centímetros para sensores na banda L (GAMA *et al.*, 2013).

A técnica A-DInSAR consiste no uso de diversas aquisições SAR para a detecção e construção de séries temporais de sinais com retroespalhamento semelhante ao de alvos pontuais. Essas séries são usadas para filtrar as componentes de fase indesejáveis e modelar a movimentação do terreno. Sua efetividade é incrementada com o uso de um grande número (a partir de 15) de imagens (MACEDO *et al.*, 2011; MURA, 2013).

2.2.4.1. Interferometria Diferencial por Série Temporal

A técnica SBAS, desenvolvida por Berardino *et al.* (2002) um subconjunto de imagens com linhas de base curtas (SBAS), cuja combinação de várias séries de interferogramas SAR é gerada a partir de uma seleção adequada dos pares de imagens SAR, permitindo obter um mapa denso de medidas de deformação. Os pares são caracterizados por uma pequena separação espacial e temporal (linha de base) entre as órbitas de aquisição, com uma alta amostragem temporal, utilizando todas as aquisições de diferentes subconjuntos de linha de base pequena e preservando a capacidade do sistema. O algoritmo da técnica emprega o método dos mínimos quadrados para detectar a deformação da superfície do solo e analisar a sua evolução temporal, gerando mapas de deformação e velocidade média. O diferencial da SBAS, além de empregar interferogramas *multilook*, é a escolha de pares de imagens SAR envolvidos na geração do interferograma com o objetivo de minimizar a linha de base espacial, reduzindo a decorrelação e os erros topográficos (BERARDINO *et*

al., 2002; LANARI *et al.*, 2004; GAMA *et al.*, 2015a). Gama *et al.* (2015b) aplicaram a técnica SBAS sobre PDEs na Província Mineral de Carajás e comprovaram sua adequabilidade para medidas quantitativas de deformação superficial, permitindo uma visão sinóptica da área de estudo.

De acordo com Mura *et al.* (2014), algoritmos para análise de séries temporais DInSAR foram desenvolvidos para superar as limitações da técnica DInSAR simples a partir do uso de um número redundante de interferogramas diferenciais. Esta abordagem considera um conjunto de M interferogramas diferenciais gerados a partir de um conjunto de M+1 imagens SAR, adquiridas em ordem temporal (t_0, t_1, \dots, t_N) , onde cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δt) , segundo as regras de menor intervalo de tempo entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base curtas (SBAS). Tomando-se um ponto estável como referência e um ponto genérico selecionado, os valores de fase (interferogramas) desdobrada observados neste ponto em relação ao de referência podem ser organizados em um vetor de M elementos, segundo a equação (2.9):

$$\phi_{Ob}^T = [\phi_{\Delta t1}, \phi_{\Delta t2}, \dots, \phi_{\Delta tM}] \quad (2.9)$$

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

$$\phi_{disp}^T = [\phi_{\Delta r1}(t_1), \phi_{\Delta r2}(t_2), \dots, \phi_{\Delta rN}(t_N)] \quad (2.10)$$

A relação entre o deslocamento (2.10) e os dados observados (2.9) pode ser representada como um sistema de M equações de N variáveis desconhecidas, na seguinte forma matricial:

$$A\phi_{disp} = \phi_{Ob} \quad (2.11)$$

em que A é uma matriz de dimensão NxM de operadores de adição, subtração e ausência (1, -1, 0) entre os pares interferométricos. A solução do sistema de

equações (2.11) pode ser obtida, por meio da abordagem de Mínimos Quadrados (MQ), (LUNDGREN *et al.*, 2001) por:

$$\phi_{disp} = A^+ \phi_{ob} \quad (2.12)$$

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

Em situações em que seja necessário utilizar-se um grande número de pares interferométricos diferenciais para aumento da amostragem temporal, o sistema de equações em (2.12) torna-se mal condicionado e, portanto, o sistema terá infinitas soluções. Para solução deste problema, o sistema em (2.12) pode ser invertido mediante a aplicação do método SVD (*Singular Value Decomposition*) (GOLUB e LOAN, 1989). O resultado de (2.12), ou seja, o deslocamento de superfície no sentido da linha de visada do radar (LoS) pode apresentar algumas descontinuidades no intervalo de tempo em estudo, que não faz sentido no estudo de deformações. Para isso, uma solução mais eficaz foi obtida através da minimização da norma do vetor velocidade de deslocamento, proposto por Berardino *et al.* (2002). A Figura 2.13 ilustra as etapas principais da Interferometria Diferencial por Séries Temporais no software GAMMA.

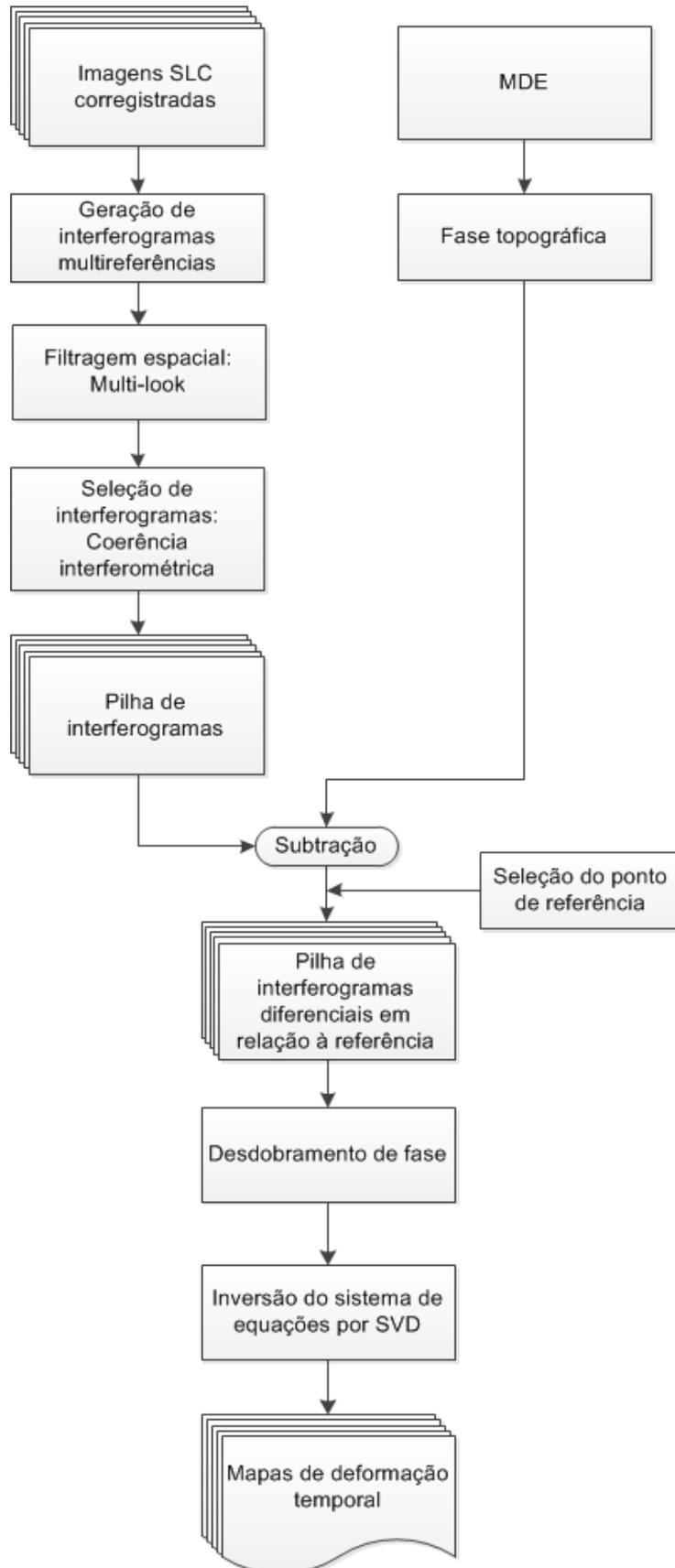


Figura 2.13 - Fluxograma de desenvolvimento básico da técnica DInSAR-TS no *software* GAMMA Remote Sensing.

2.3. Intensity Tracking

Quando há uma elevada perda de coerência entre as imagens interferométricas SAR, não é possível aplicar-se a técnica de Interferometria Diferencial para detecção de deformações superficiais no tempo. Para contornar tal limitação, Rott *et al.* (1998) propuseram a determinação de um mapa de velocidade superficial a partir da aplicação da técnica de correlação cruzada bidimensional na imagem amplitude SIR-C (banda L) sobre a região da Geleira Perito Moreno, na Patagônia, Argentina.

Desde então diversos trabalhos tem sido realizados com base nesta abordagem, recebendo às vezes, denominações distintas, como *Intensity Tracking* (STROZZI *et al.*, 2002; ZHOU *et al.*, 2011; HARANT *et al.*, 2011) e *Intensity Based Pixel Tracking* (YAN *et al.*, 2013).

Aplicações semelhantes neste contexto podem ser encontradas na literatura, como *Coherence Tracking* – baseada na otimização de coerência por janelas (STROZZI *et al.*, 2002); *Feature Tracking* – baseada na detecção das mesmas feições em uma sequência de imagens de forma confiável e consistente (ZHOU *et al.*, 2011); *Maximum-Likelihood (ML) Texture Tracking* – que considera as estatísticas do sinal retroespalhado utilizando o algoritmo de máxima verossimilhança (HARANT *et al.*, 2011) e *Speckle Tracking* – baseada na exploração do padrão *speckle* entre pares de imagens SAR (PARADELLA *et al.*, 2015a).

Todos estes métodos que utilizam diversos algoritmos de correspondência e são baseados em diferentes feições, como alvos pontuais isolados, alvos distribuídos, texturas ou outras estatísticas de ordem maior, assim como informação de fase, podem ser englobados no conceito *Offset Tracking* ou *Correlation Like* (FANG; STILLA, 2014).

O algoritmo clássico de correspondência de intensidade determina deslocamentos locais entre um par de imagens através da Correlação Cruzada Normalizada. A correlação é uma operação matemática que mede o grau de similaridade entre duas variáveis. No processamento digital de sinais, o cálculo da correlação tem como entrada dois sinais discretos no tempo e como saída,

um novo sinal - correlação cruzada - que estima a similaridade entre os dois sinais, considerando possíveis deslocamentos no tempo (SORGATO, 2010).

O método supõe que, para duas imagens sequenciais de mesma região, as feições na segunda imagem são as mesmas que as da primeira, só que deslocadas de suas posições originais pelo campo de velocidades.

Esta técnica baseia-se em um conjunto de imagens SAR complexas organizadas em pares e precisamente corregistradas. Utiliza-se apenas a amplitude do sinal SAR, evitando a necessidade do desdobramento de fase, uma das etapas mais críticas da interferometria. A etapa de corregristo deve ser executada com máxima precisão, uma vez que representa a principal fonte de erros na determinação de deformações por estimação de *offsets*, que dependendo do algoritmo utilizado, está entre 1/20 a 1/30 do tamanho do pixel (STROZZI *et al.*, 2002; CASU *et al.*, 2011).

O campo de *offsets* é gerado por correlação cruzada de janelas na imagem intensidade. O sucesso da estimação dos *offsets* locais depende da presença de feições aproximadamente iguais nas duas imagens na escala da janela utilizada. Quando há coerência, o padrão *speckle* em ambas é correlacionado, e então são utilizadas pequenas janelas de busca com uma melhor coerência. Áreas com baixa coerência, no entanto, exigem janelas de busca maiores. A fim de aumentar a acurácia da estimativa, taxas de superamostragem são aplicadas às janelas, e uma regressão de ajuste para modelar a função de correlação em torno do pico é determinada com uma interpolação de quatro pontos. A localização do pico da função de correlação cruzada fornece o *offset* da janela (STROZZI *et al.*, 2002).

À medida que a janela de referência se desloca pixel a pixel dentro da janela de busca, o coeficiente de correlação entre a janela de referência e o subconjunto de sobreposição da janela de busca é determinado (Figura 2.14). Um mapa de intensidade de correlação é então calculado em cada posição da janela de referência. As coordenadas do pico de correlação fornecem o ponto conjugado do centro da janela de referência dentro da janela de busca e o deslocamento bidimensional entre as imagens (AHN; HOWAT, 2010). A matriz

bidimensional (coeficientes de correlação em posições relativas sucessivas), obtida da correlação cruzada entre as imagens apresentará um coeficiente de correlação máximo, identificando assim a nova posição da feição. A partir do vetor deslocamento desta feição e do intervalo entre as imagens estima-se o vetor de velocidade média da feição, que é uma estimativa local do campo de velocidades (AÑAZCO; FRANÇA, 2004). Para eliminar correlações aleatórias causadas por ruídos, um teste de significância pode ser aplicado. Se o coeficiente de correlação exceder um limiar adotado, então a defasagem espacial entre as duas subáreas representa um deslocamento real (GAO; LYTHER, 1996).

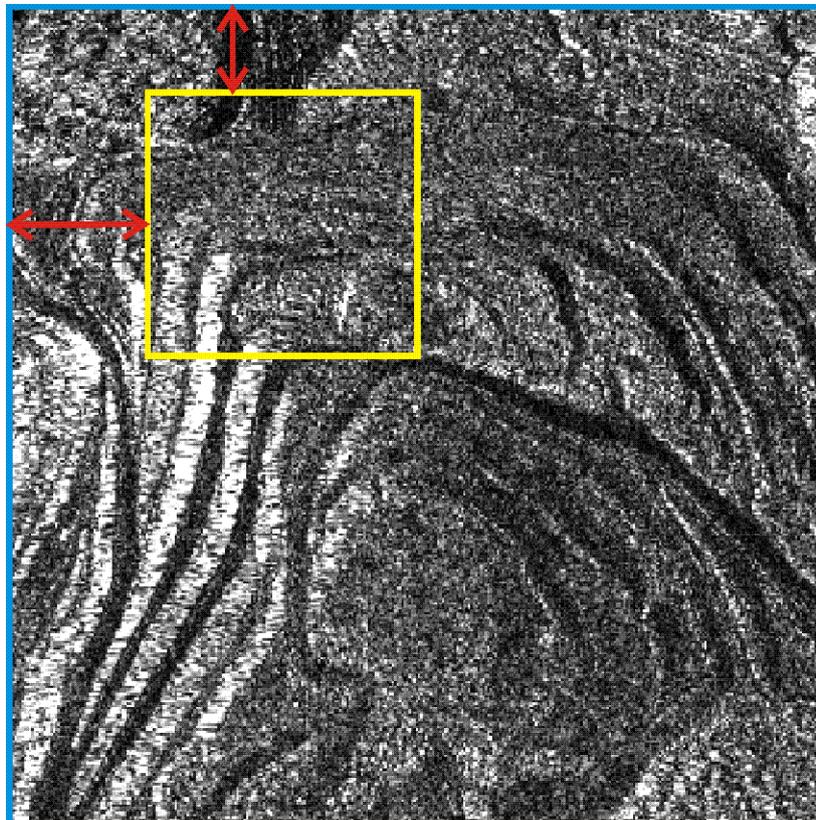


Figura 2.14 – Representação do cálculo de correlação cruzada entre as janelas de busca (em azul) e de referência (em amarelo) e margens de busca (em vermelho) nos eixos vertical e horizontal.

Werner *et al.* (2005) descreve o processo de determinação do campo de deslocamentos nas imagens: os *offsets* são medidos a partir de janelas de tamanho $M1 \times M2$ pixels (*range* x *azimute*) em um conjunto de posições no par de cenas SLC. Uma constante inicial de deslocamento em *range* e *azimute* é determinada para a cena toda. O *offset* residual após esta etapa inicial não deve ser maior que uma pequena fração da dimensão da janela utilizada para

determinar o campo de *offsets*. Tamanhos típicos para M1 e M2 são da ordem de 16 a 256 pixels, dependendo do nível de ruído na imagem e da aplicação. Dados da janela são extraídos de cada imagem e quaisquer gradientes de fase em *range* ou azimute são removidos. Posteriormente os dados da janela são superamostrados por um fator de 2 ou 4 a partir da interpolação FFT. A localização do máximo da função de correlação bidimensional fornece os *offsets* desejados em *range* e azimute. A função de correlação $C(n_1, n_2)$ é definida por (2.13):

$$R(n_1, n_2) = \sum_0^{M_1} \sum_0^{M_2} I_1(m_1 + n_1, m_2 + n_2) I_2^*(m_1, m_2) \quad (2.13)$$

Onde I_1 e I_2 são os dados superamostrados das imagens intensidade $S_1 S_1^*$ e $S_2 S_2^*$, respectivamente. A correlação é mais eficientemente implementada usando uma FFT bidimensional (2.14):

$$R(n_1, n_2) = FFT^{-1}[\tilde{I}_1(m_1, m_2) \tilde{I}_2^*(m_1, m_2)] \quad (2.14)$$

A função $R(n_1, n_2)$ amostra a função de correlação em 0,5 ou 0,25 pixels quando o fator de superamostragem é 2 ou 4. Para obter uma estimativa acurada do pico de correlação, os valores da função sobre uma região 3x3 são ajustados através de uma superfície polinomial biquadrática. A Relação Sinal-Ruído (SNR) da medida de *offset* é obtida tomando a razão do valor do pico dividido pelo nível de correlação média fora da região 3x3 do pico.

No *software* GAMMA Remote Sensing o fluxo de processamento da técnica *Intensity Tracking* incorpora basicamente as etapas de correção das imagens SLC; determinação da componente amplitude e cálculo dos *offsets* entre as imagens através do algoritmo de correlação cruzada, que proporciona a geração dos mapas de deformação em *range* e azimute, na direção de visada do satélite. Esses mapas são então geocodificados para a geometria do terreno. A Figura 2.15 ilustra este fluxo de processamento.

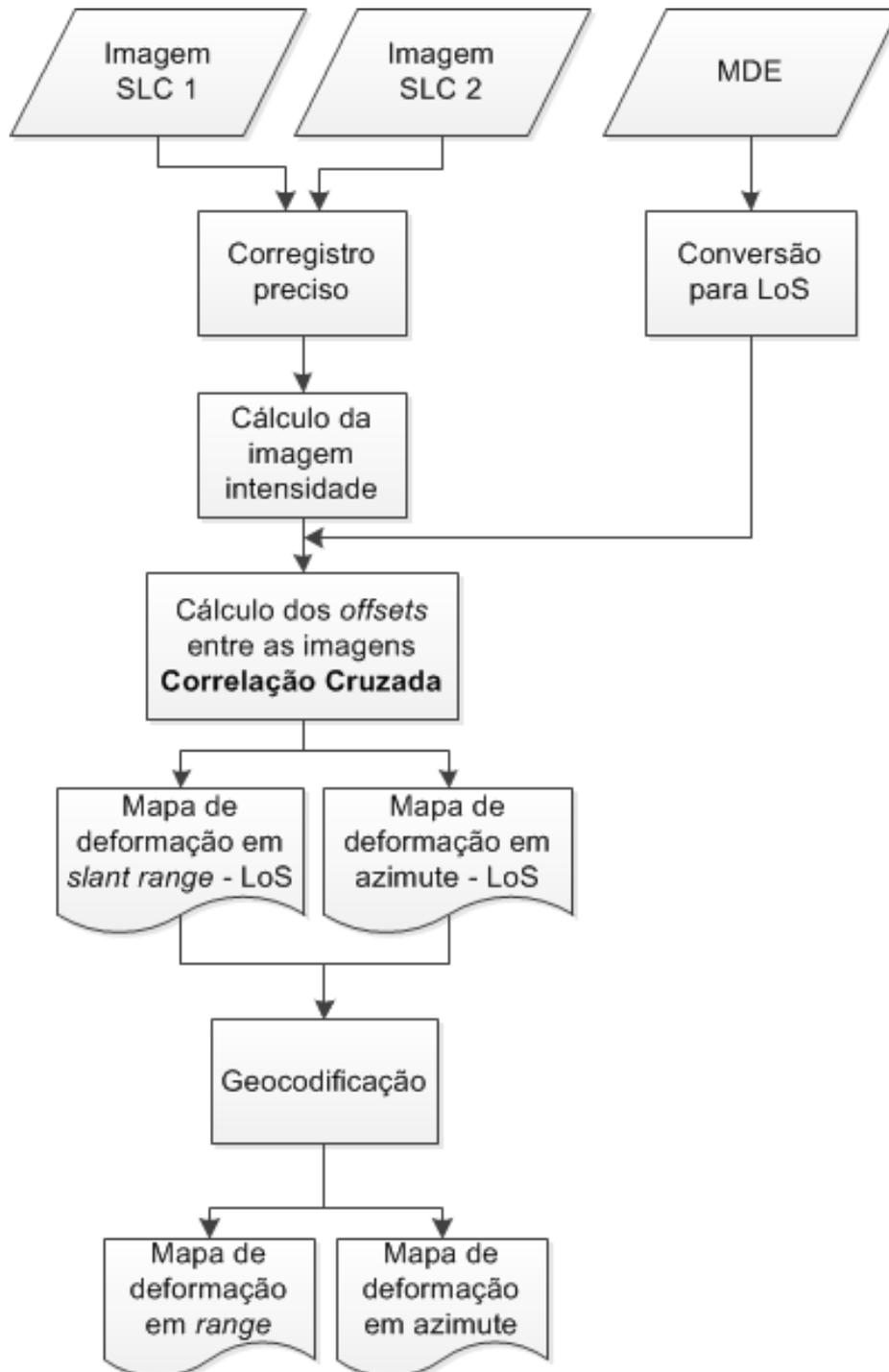


Figura 2.15 - Fluxograma de desenvolvimento básico da técnica *Intensity Tracking* no *software GAMMA Remote Sensing*.

2.4. TerraSAR-X

O primeiro satélite da série TerraSAR-X, primeiro radar orbital comercial de alta resolução, foi lançado no dia 15 de junho a partir de Baikonur, no Cazaquistão, com uma órbita hélio-síncrona de altitude de 514 km e tempo de revisita de 11 dias. É o primeiro projeto espacial alemão desenvolvido sob Parceria Público-Privada, entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a EADS Astrium. O satélite possui um SAR, que opera na banda X ($\lambda=3,1$ cm) e fornece imagens com elevada qualidade radiométrica e resolução espacial nominal de até 1m. Possui três modos de aquisição de imagens: *SpotLight*, *Stripmap* e *ScanSAR*. A Tabela 2.1 apresenta os modos de operação do satélite e as características dos produtos para cada opção.

Tabela 2.1 - Modos de operação do TerraSAR-X. Fonte: Airbus (2016).

MODO	<i>SpotLight</i>	<i>Stripmap</i>	<i>ScanSAR</i>
Ângulo de incidência	20° - 55°	20° - 45°	20° - 45°
Polarização	HH ou VV	HH ou VV	HH ou VV
	Dual (HH/VV)	Dual (HH/VV ou HH/HV ou VV/HV)	HH ou VV
Resolução	Até 2 m	Até 3 m	Até 18,5 m
Faixa imageada	10 x 10 km	30 x 50 km	100 x 150 km

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1. Complexo Minerador de Carajás

A região de estudo, limitada a norte pelas coordenadas UTM 590086,090 mE e 9333091,921 mS e a sul pelas coordenadas 593644,743 mE e 9327760,556 mS, concentra-se nas PDEs NWI, W e SIV, inseridas no Complexo Minerador de Carajás, situado no interior da Floresta Nacional de Carajás, no município de Parauapebas, a sudeste do estado do Pará; cuja principal fonte de recursos é representada pela atividade mineradora. A reserva mineral foi descoberta em 1967 e desde 1985 a Vale administra as jazidas exclusivamente. Com produção anual de milhões de toneladas, é o maior produtor mundial de minério de ferro, cuja qualidade também é reconhecida mundialmente (teor de concentração de aproximadamente 67%) e baixa concentração de impurezas.

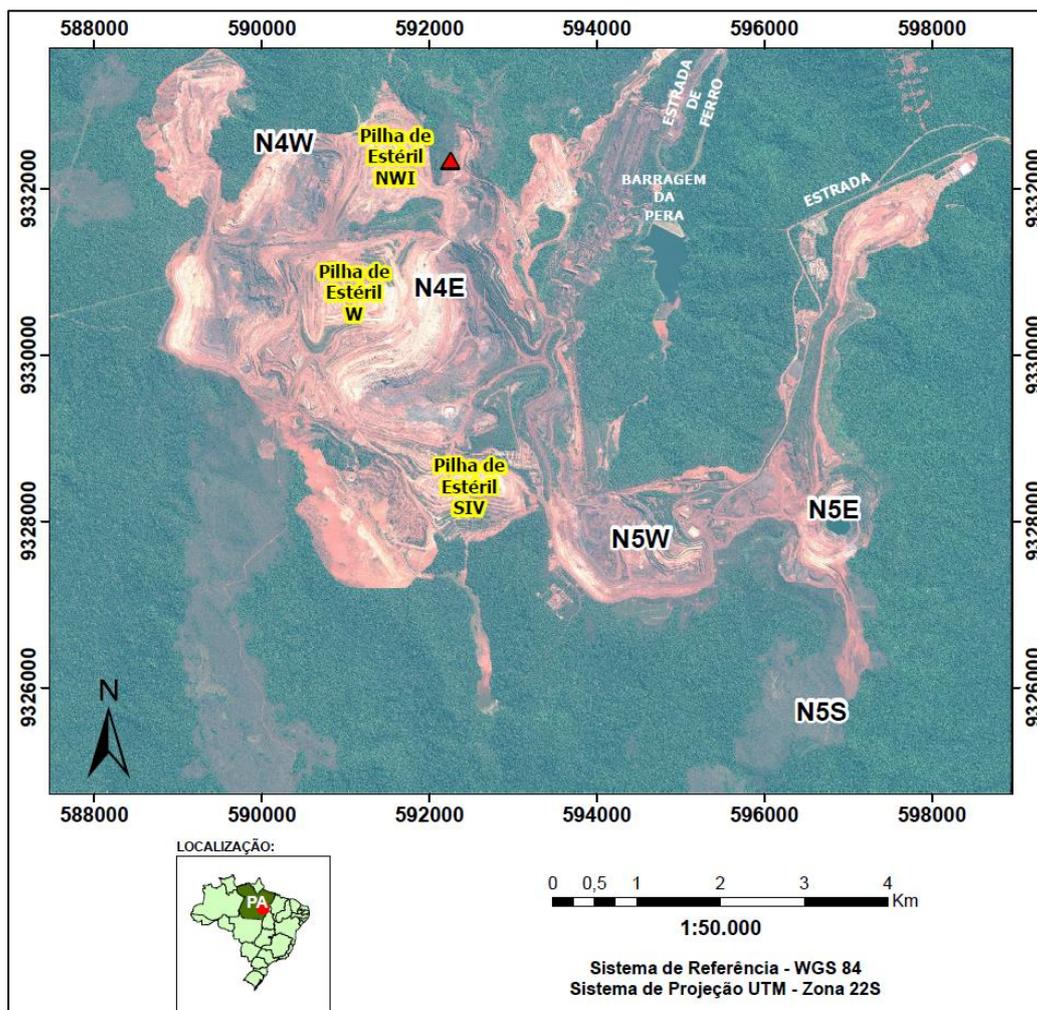


Figura 3.1 - Localização das minas N4W, N4E e N5W no Complexo Minerador de Carajás, e suas respectivas PDEs NWI, W e SIV e refletor de canto (triângulo em vermelho).

O complexo engloba atualmente a operação de cinco minas a céu aberto – N4E, N4W, N5E, N5W e N5S com mais uma em fase de abertura – S11D. A PDE NWI situa-se na mina N4W, a W encontra-se na mina N4E e a SIV situa-se nos limites da mina N5W. A Figura 3.1 mostra a localização das PDEs alvo desta dissertação no Complexo Minerador de Carajás.

A Província Mineral de Carajás, que conta com uma área de 120.000 km², é marcada por terrenos montanhosos, caracterizada por um conjunto de colinas e planaltos (altitudes entre 500 e 900 m), cercado por planícies ao sul e ao norte (com altitudes em torno de 200 m), com intenso intemperismo químico, que produziu espessa camada de latossolos, totalmente cobertos por comunidades de floresta Ombrófila Equatorial de numerosas espécies (PARADELLA *et al.*, 2015b).

3.1.1. Aspectos climáticos

A região da Floresta Nacional de Carajás possui dois grupos climáticos: Equatorial Continental e Equatorial Mesotérmico de Altitude. Ao clima equatorial continental corresponde a extensa região das áreas colinosas de altitudes baixas, geomorfologicamente incluídas na classificação da Depressão Periférica do Sul do Pará. A altitude da Serra dos Carajás condiciona o aparecimento de um clima equatorial mesotérmico de altitude. Os valores das temperaturas médias anuais são mais baixos e as grandes oscilações do relevo identificam dois sub-tipos climáticos, com significativas diferenças de temperatura. O sub-tipo climático das encostas é caracterizado por temperaturas médias de 25°C a 26°C, baixa insolação (5 a 6 horas), ventos fracos e má ventilação. As precipitações anuais estão entre 1.900 e 2.000 mm. O sub-tipo climático dos topos é caracterizado por temperaturas médias entre 23°C e 25°C, baixa insolação (4,5 a 5 horas), ventos moderados e boa ventilação. As precipitações anuais são entre 2.000 e 2.400 mm. Segundo a classificação de Köopen, o clima da região enquadra-se no tipo "AWi" - tropical chuvoso com seca de inverno. Os parâmetros que o determinam são: forte período de estiagem coincidindo com o inverno do Hemisfério Sul, altos valores totais de precipitação anual e temperatura mensal sempre acima de 18°C. A região apresenta o período de estiagem com cinco meses consecutivos, de

junho a outubro, enquanto o período chuvoso vai de dezembro a abril e dois períodos de transição: seco-chuvoso em novembro e chuvoso-seco em maio (IBAMA, 2003).

A Figura 3.2 apresenta a distribuição pluviométrica mensal no período correspondente às aquisições das imagens TerraSAR-X, cujos dados foram coletados na estação localizada na mina N4E. No eixo horizontal encontram-se os meses, de março de 2012 a abril de 2013. O eixo vertical apresenta a pluviometria (em milímetros). As barras verticais em vermelho marcam as datas de aquisição de cada imagem TerraSAR-X utilizadas neste trabalho.

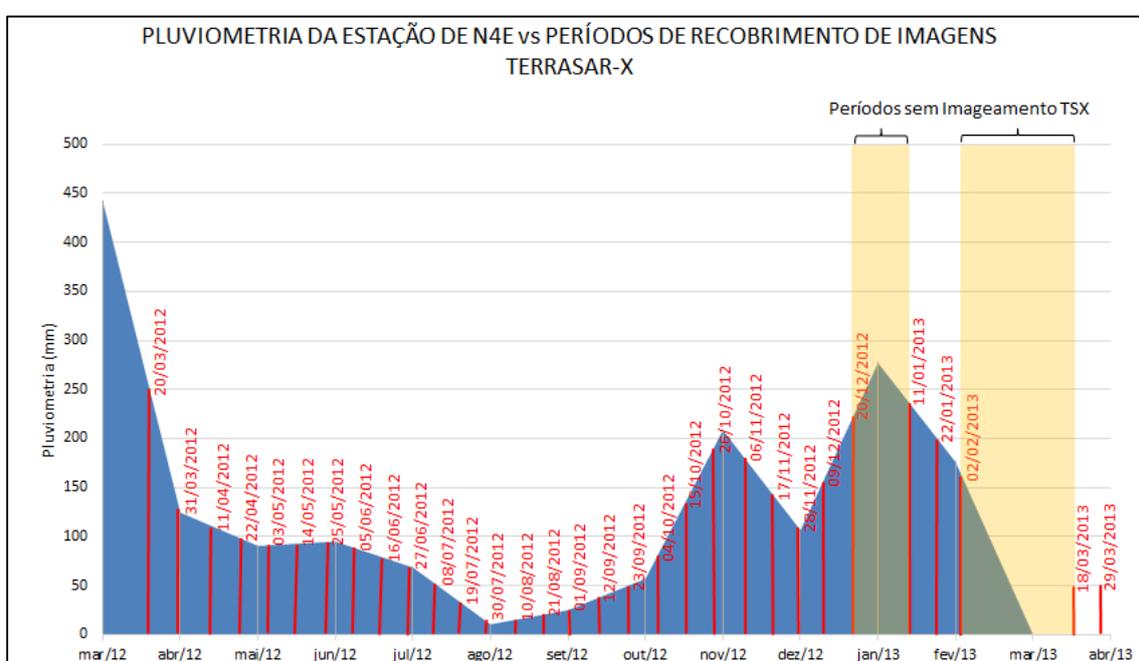


Figura 3.2 - Dados de precipitação referentes ao período de aquisição das imagens TerraSAR-X.

Fonte: adaptado de Paradella *et al.* (2015a).

3.1.2. Aspectos geológicos

O Complexo Minerador de Carajás situa-se na porção sudeste do Cráton Amazônico, e é considerado seu segmento mais antigo (>2,3 Ga) (TASSINARI e MACAMBIRA, 1999). O Bloco Carajás é limitado a leste pelo Cinturão Neoproterozóico Araguaia, a norte pela província paleoproterozóica Maroni-Itacaiúnas, e a sul e oeste, pelo domínio Santana do Araguaia e rochas vulcânicas paleoproterozóicas do Supergrupo Uatumã (VASQUES; ROSA-COSTA, 2008).

A Serra dos Carajás localiza-se na região leste do Escudo Brasil Central, nos domínios do Cráton-Amazonico, estando adjacente ao Cinturão Araguaia. São observadas na região rochas arqueanas e proterozóicas abrigadas nos: Terreno Granito-Gnáissico de Alto Grau; Terreno Granito Greenstone e Seqüências Vulcano-Sedimentares Supracrustais de Baixo Grau (ARAÚJO; MAIA, 1991; PINHEIRO, 1997).

Oliveira (2002) destaca dois modelos tectônicos principais propostos na literatura para a região de Carajás. O modelo apresentado por Araújo e Maia (1991) destaca a evolução crustal da área sugerindo uma colisão oblíqua entre segmentos continentais, originando o Cinturão Itacaiúnas, no final do Arqueano. Em decorrência deste episódio foram gerados sistemas imbricados articulados a sistemas transcorrentes em diferentes domínios regionais, que envolveu retrabalhamento das rochas presentes nos terrenos granito-greenstones e condicionou a deposição de rochas supracrustais ao longo dos sistemas transcorrentes. Em seguida, no Proterozóico Inferior vários segmentos rochosos foram permeados por corpos graníticos e máfico-ultramáficos devido à atuação de uma componente extensional de direção NE-SW. Esse evento foi acompanhado pela instalação de bacias transtensivas preenchidas por rochas vulcânicas e/ou sedimentares. No Mesozóico e Cenozóico a evolução se encerra com a instalação de sistemas de relevos e drenagem controlados a partir das estruturas pretéritas. Essa proposta de estruturação das rochas de Carajás pode ser resumida como organizada por cavalgamentos oblíquos, de caráter rúptil-dúctil, decorrentes do evento transpressivo sinistral responsável pela inversão fraca das bacias transtensivas anteriormente formadas.

Por sua vez, Pinheiro (1997) propõe que no primeiro estágio evolutivo regional (Arqueano, aproximadamente 2.8 Ga) teria havido transpressão sinistral dúctil afetando o embasamento na chamada Zona de Cisalhamento Itacaiúnas. Posteriormente, ocorreu um evento transpressivo sinistral que ocasionou deformação e metamorfismo das rochas do Grupo Igarapé Pojuca. Por volta de 2.7 Ga houve a formação de uma bacia extensa (intracratônica), acompanhada de deposição, e vulcanismo do Grupo Grão Pará. Em aproximadamente 2.6 Ga

a região foi submetida à movimentação transtensional dextral que ocasionou o desenvolvimento dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento. Nesse estágio houve a nucleação de Falha Carajás. Entre 2.6 e 1.9 Ga (Proterozóico Inferior) houve inversão tectônica dada pela reativação por transpressão sinistral particularmente da Falha Carajás (OLIVEIRA, 2002).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Para este estudo foram disponibilizados o material:

- 33 imagens TerraSAR-X adquiridas no modo *StripMap* com intervalos de 11 dias entre elas, de modo a recobrirem o intervalo de um ano. No entanto, conflitos na programação de aquisição do satélite TerraSAR-X com a missão TanDEM-X causaram uma interrupção na cobertura em 2012 (31 de dezembro) e três em 2013 (13 e 24 de fevereiro e 7 de março).

As imagens no formato *Single Look Complex* (SLC) foram adquiridas em órbita ascendente (com azimute de visada de aproximadamente 80°), ângulo de incidência variando de 39,89° em *near range* a 42,21° em *far range* e resolução espacial de 1,7 metros em *range* e 3,49 metros em azimute. As linhas de base perpendiculares variam entre 7,18 e 487,65 metros.

- Imagens GeoEye-1 pancromática e multiespectral da área de estudo com resolução espacial de 0,5 metros, cuja ortorretificação foi realizada no módulo OrthoEngine do *software* PCI Geomatics (versão 2013).
- Modelo Digital de Elevação com espaçamento de pixel de 2 metros gerado a partir de um par estéreo de imagens pancromáticas do satélite GeoEye-1 adquiridas em 01 de julho de 2012 (PARADELLA; CHENG, 2013).
- Dados topográficos, correspondentes a medições sistemáticas realizadas por contratada da Vale S.A, para locais que sofreram movimentação operacional em superfície, a partir do uso de estação total/prismas refletidos.
- Dados de aplicação da técnica *Speckle Tracking* fornecidos pela TRE (PARADELLA *et al.*, 2015a)
- *Software* GAMMA Remote Sensing para o processamento SAR.
- *Software* ENVI para visualização de dados e produtos.

- *Software* ArcGIS 10 (ESRI) para visualização de produtos e geração de mapas.

4.2. Métodos

Os dados e informações relativos ao comportamento climático da região a que pertence a área de estudo proporcionaram a divisão das 33 imagens disponíveis em dois períodos: seco, que compreende as 19 primeiras imagens (entre 20 de março e 4 de outubro de 2012) e chuvoso, com as 15 restantes (4 de outubro de 2012 a 20 abril de 2013); tendo a imagem de 04 de outubro em comum. Optou-se por essa segmentação para que fosse possível verificar a influência da sazonalidade nos resultados, uma vez que se conhece sua atuação sobre a coerência, cuja descorrelação é favorecida pela precipitação.

Convencionalmente a nomenclatura adotada para denominação das imagens e produtos gerados a partir delas atendem ao padrão AAAAMMDD (quatro dígitos referentes ao ano, dois dígitos referentes ao mês e dois referentes ao dia de aquisição das imagens). Como exemplo, 20120320 refere-se à imagem adquirida em 20 de março de 2012, enquanto 20121220_20130111 refere-se ao par de imagens adquiridas em 20 de dezembro de 2012 e 11 de janeiro de 2013.

A metodologia empregada nesta pesquisa incorpora três etapas principais: análise das imagens de coerência, processamento DInSAR por de série temporal para os períodos seco, chuvoso e completo; processamento *Intensity Tracking* para os pares de imagens selecionados e validação e dos resultados, como ilustra a Figura 4.1. De forma a concentrar os resultados obtidos em cada etapa para posterior análise, elaborou-se um banco de dados a partir do *software* ArcGIS no modelo *.mxd*. Todos os processamentos a partir de imagens SAR descritos neste capítulo foram realizados no *software* GAMMA. A ordem cronológica dos processos aplicados pode ser conferida no Apêndice A.

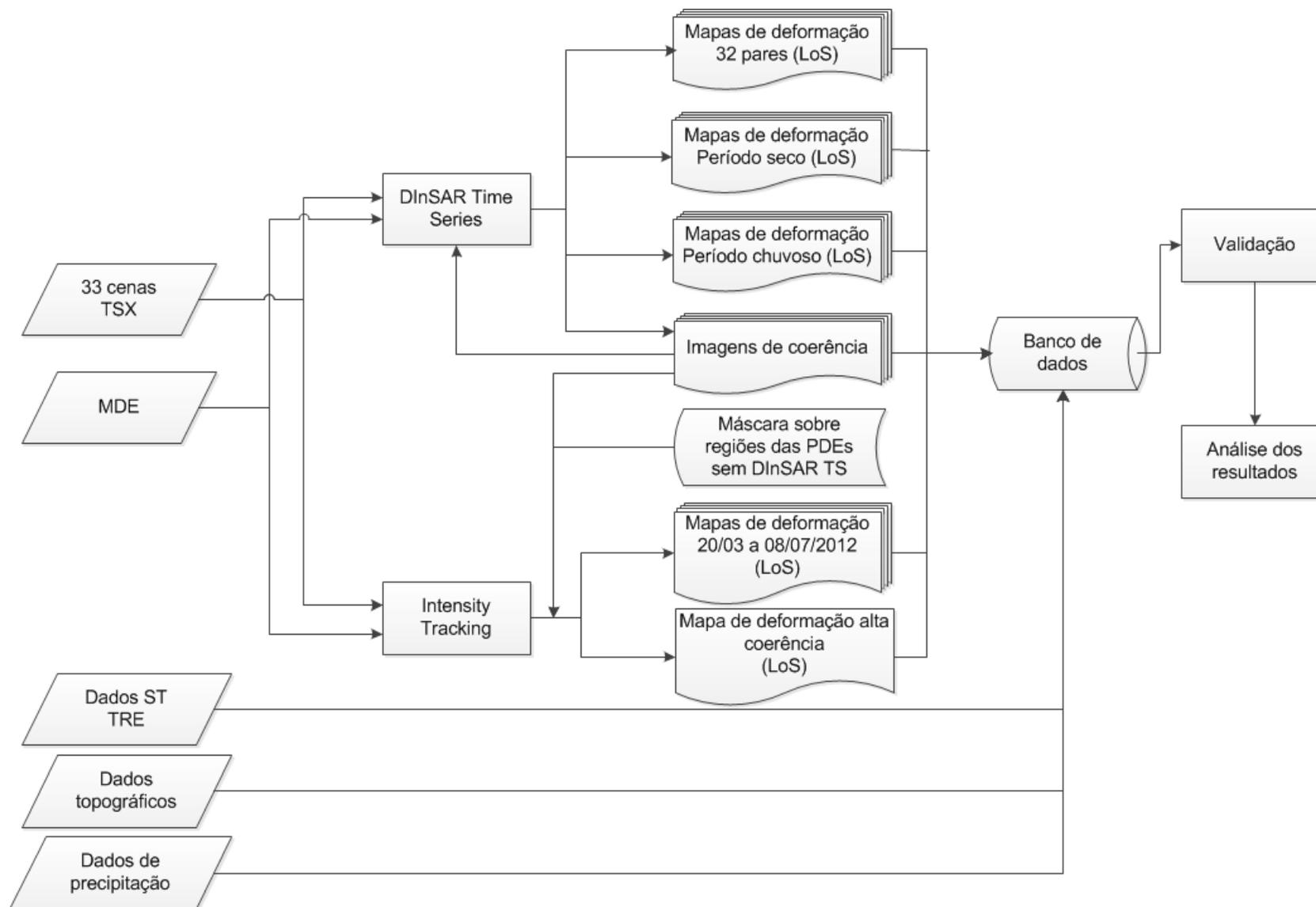


Figura 4.1 - Fluxograma das atividades realizadas na pesquisa.

4.2.1. Processamento SAR

A realização desta pesquisa incorporou a aplicação de duas abordagens de processamento SAR implementadas no módulo DIFF/GEO do software GAMMA: Interferometria Diferencial por série temporal e *Intensity Tracking*.

4.2.1.1. DInSAR *Time-series*

Uma vez que a técnica PSI implementada no módulo IPTA do software GAMMA não apresentou resultados satisfatórios para o monitoramento de deformações das PDEs (Paradella *et al*, 2015a), com considerável escassez ou mesmo ausência de pontos sobre elas, recorreu-se à técnica de Interferometria Diferencial por série temporal (DInSAR-TS) para a geração de mapas de deformação. Embora esta abordagem incorpore uma precisão menor em relação àquela, sua aplicabilidade é maximizada, já que não há necessidade de identificação de pontos com retroespalhamento persistente ao longo das imagens.

A etapa inicial desta aplicação consiste no registro preciso entre as imagens que irão compor a pilha. A imagem de referência do registro (mestre) foi selecionada de modo que apresentasse menor dispersão de linha de base perpendicular, reduzindo a descorrelação temporal entre as cenas (ZEBKER e VILLASENOR, 1992) e que estivesse próxima ao centro da série, maximizando a coerência interferométrica entre elas, como apresenta a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Imagens de referência para o registro inicial na DInSAR-TS.

Período	Imagem de referência (mestre)
Seco (20/03/2012 a 04/10/2012)	20120708
Chuvoso (04/10/2012 a 20/04/2013)	20121220
Completo (20/03/2012 a 20/04/2013)	20120912

Posteriormente foram gerados os interferogramas diferenciais multireferências, ou seja, todos os pares de imagens enquadrados nos critérios de linhas de base temporal (Δt) e espacial, apresentados na Tabela 4.2. Posteriormente os interferogramas foram filtrados a partir da operação *multi-look* de 2x2 pixels.

As falhas nas aquisições das imagens causaram descontinuidades de 22 e 44 dias entre os pares 2012120_20130111 e 20130202_20130318, respectivamente. A fim de cobrir também estes intervalos de descontinuidade, geraram-se pares interferométricos para intervalos de até 45 dias com linha de base perpendicular de até 800 metros (MURA *et al.*, 2014). Foram gerados 110 pares interferométricos para o conjunto de imagens referente ao período completo, 66 para o período seco e 38 para o período chuvoso, como é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Critérios de linha de base para geração de interferogramas e pares interferométricos simulados para cada período.

Período	Linha de base temporal (dias)	Linha de base espacial (m)	Pares simulados
Seco (20/03/2012 a 04/10/2012)	45	600	66
Chuvoso (04/10/2012 a 20/04/2013)	45	600	38
Completo (20/03/2012 a 20/04/2013)	45	800	110

Aplicou-se nos interferogramas um filtro espacial adaptativo de tamanho 64x64 pixels para geração das imagens de coerência, de acordo com Goldstein (1998).

Foi realizada então uma seleção dos interferogramas que apresentaram maior valor de coerência interferométrica média com o objetivo de minimizar erros de desdobramento de fase. Dos 110 interferogramas gerados para o período completo, 32 foram eleitos por sua maior coerência média (como realizado por Mura *et al.*, 2014) sobre as áreas das PDEs, determinadas a partir de uma máscara definida por seus limites.

Removeu-se então a componente de fase relativa ao MDE dos pares selecionados a partir da identificação de um ponto de referência estável, o que possibilitou a realização do processo de desdobramento de fase pelo algoritmo MCF (CONSTANTINI, 1998) utilizando os interferogramas.

A partir da pilha de interferogramas diferenciais selecionados, realizou-se a análise temporal através da solução do sistema de equações baseadas no

método SVD, com fator de suavização da série temporal $\gamma = 1,6$ (MURA *et al.*, 2014). Foram então gerados os mapas de deformação temporal para os respectivos períodos.

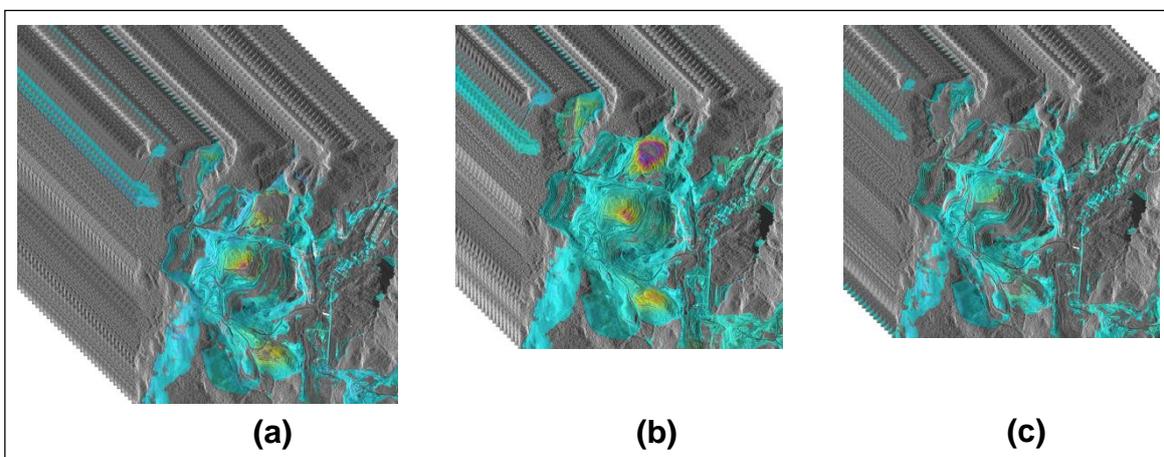


Figura 4.2 - Mapas de deformação DInSAR-TS para período completo (a), seco (b) e chuvoso (c).

4.2.1.2. Intensity Tracking

A aplicação da técnica DInSAR-TS possibilitou o recobrimento de grande parte da área com ausência de PS. No entanto, regiões que sofreram intensa movimentação no período entre as aquisições das imagens apresentaram elevada decorrelação, o que limitou o processo de desdobramento de fase, provocando ausência de resultados de interferometria diferencial por série temporal. Determinadas áreas sobre as PDEs NWI, W e SIV encaixam-se nesta situação. Na busca por solucionar esta limitação optou-se por aplicar a técnica *Offset Tracking* sobre imagens de intensidade (denominada *Intensity Tracking*), cuja precisão é reduzida, mas possibilita a inferência de comportamento, ainda que grosseira, de regiões na superfície que sofreram ausência de resultados na aplicação das demais técnicas.

Para seleção das imagens para aplicação da *Intensity Tracking* utilizou-se uma máscara sobre as imagens de coerência delimitando as regiões com ausência de informação pela técnica DInSAR-TS, o que permitiu determinar qual par apresentou coerência média mais elevada nestes locais, processo auxiliado pela observação da coerência de um refletor de canto (*corner reflector*) (Figura 3.1), cujo retroespalhamento é alto no sistema SAR, instalado nas proximidades da área de estudo.

A técnica *Intensity Tracking* é realizada par-a-par, como na abordagem DInSAR. Sua etapa inicial consiste no registro preciso entre as imagens. A remoção da informação de fase se dá pelo cálculo da intensidade de cada pixel, a partir do qual foi possível estimar o *offset* das direções de range e azimute entre as imagens através do algoritmo de correlação cruzada (WERNER *et al.*, 2005). Selecionou-se a opção de 4º grau para o modelo polinomial de estimação, e o modo de reamostragem da interpolação pelo inverso da distância. Testes foram realizados para definir o melhor tamanho da janela para aplicação da correlação (16x16, 32x32, 64x64, 128x128), mas os melhores resultados foram obtidos com janela de 64x64 pixels. O limiar adotado para a estimativa dos *offsets* foi de 7,0, enquanto que o limiar SNR para aceitação dos valores estimados de *offsets* foi definido como 6,5, conforme recomendado por GAMMA (2013). Este procedimento resulta em um produto complexo, cuja parte real refere-se ao deslocamento em range e a parte imaginária, ao deslocamento em azimute, que são posteriormente separados em duas componentes independentes, gerando mapas de deslocamento para as duas direções, na geometria de visada do radar (LoS).

4.2.2. Validação

Os dados referentes à aplicação da técnica *Speckle Tracking* (Paradella *et al.*, 2015a) referem-se aos primeiros dez pares de imagens (as mesmas utilizadas neste trabalho) sobre a PDE NWI. Uma vez que a abordagem deste método é semelhante à implementada na *Intensity Tracking*, buscou-se realizar a comparação destes resultados a partir daqueles obtidos pela técnica DInSAR-TS.

É importante observar que a técnica *Speckle Tracking* analisada recebe a denominação *Rapid Motion Tracking* (RMT) pelo TRE (Tele-Rilevamento Europa), executor do processamento em Paradella *et al.* (2015a). A abordagem RMT parte do princípio básico do rastreamento do efeito *speckle* em imagens SAR, para extrair informação de movimento nas direções LoS e azimute a partir da verificação de conservação ou alteração das posições de pontos superficiais através das imagens temporais (TRE, 2016).

Assim, para que fosse possível realizar a comparação das técnicas aplicou-se também a *Intensity Tracking* para os primeiros dez pares de imagens TSX.

A validação a partir desses resultados teve caráter espacial e temporal, ou seja, avaliou-se o comportamento espacial dos pontos ao longo do perfil AB (Figura 4.3) entre 20 de março e 8 de julho de 2012 para as três técnicas de processamento SAR (DInSAR-TS, *Intensity Tracking* e *Speckle Tracking*) e também se analisou a deformação acumulada de dois pontos (54 e 118 – Figuras 5.22 e 5.25, respectivamente) entre essas duas datas.

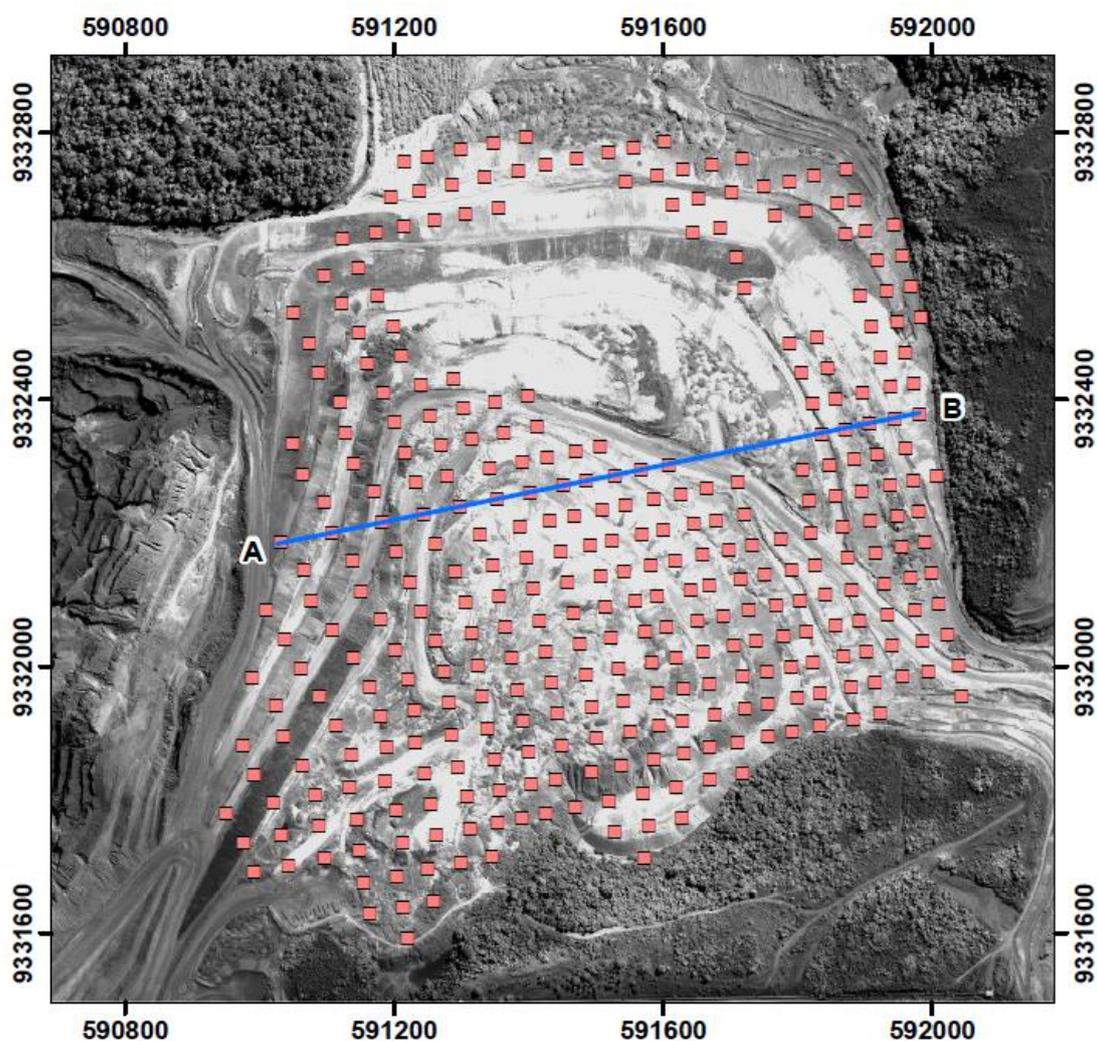


Figura 4.3 - Perfil AB sobre dados *Speckle Tracking* (em rosa) para avaliação dos resultados das técnicas DInSAR-TS e *Intensity Tracking*.

Os dados topográficos disponibilizados referem-se a levantamentos planialtimétricos sistemáticos sobre a superfície das pilhas, a partir do uso de estação total e prismas refletidos, fornecidos pela Vale S. A.

Essas medições são restritas a setores das PDEs caracterizados por mudanças de condições de superfície da atividade operacional (novos aportes de material estéril, novos taludes de aterro, retaludamentos gerais, abertura de vias de acesso, etc.). Para o restante da superfície das PDEs que não sofreram ações antrópicas, deformações por recalques são esperadas, mas sem um monitoramento sistemático de campo.

Assim, foi possível comparar dados das regiões que sofreram alteração operacional com os resultados obtidos a partir das técnicas aplicadas, o que permitiu sua validação. Para tanto, selecionou-se a PDE NWI e sobre ela um par de levantamentos topográficos (31/08/2012 e 14/09/2012) (Apêndice A) cujas datas fossem próximas ao par de imagens de aplicação da *Intensity Tracking* (20120901 e 20120912, respectivamente). Para essas regiões movimentadas antropicamente determinou-se, em cada levantamento, uma superfície matemática (MDE) que estimasse o comportamento do terreno a partir da interpolação dos pontos. A seleção do interpolador que melhor ajustasse um modelo matemático sobre os pontos foi realizada através da análise da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE – *Root Mean Squared Error*) dos interpoladores disponíveis no software ArcGIS 10.0 (Tabela 4.3), utilizando pontos de controle aleatórios bem distribuídos, cuja localização pode ser conferida na Figura 4.4.

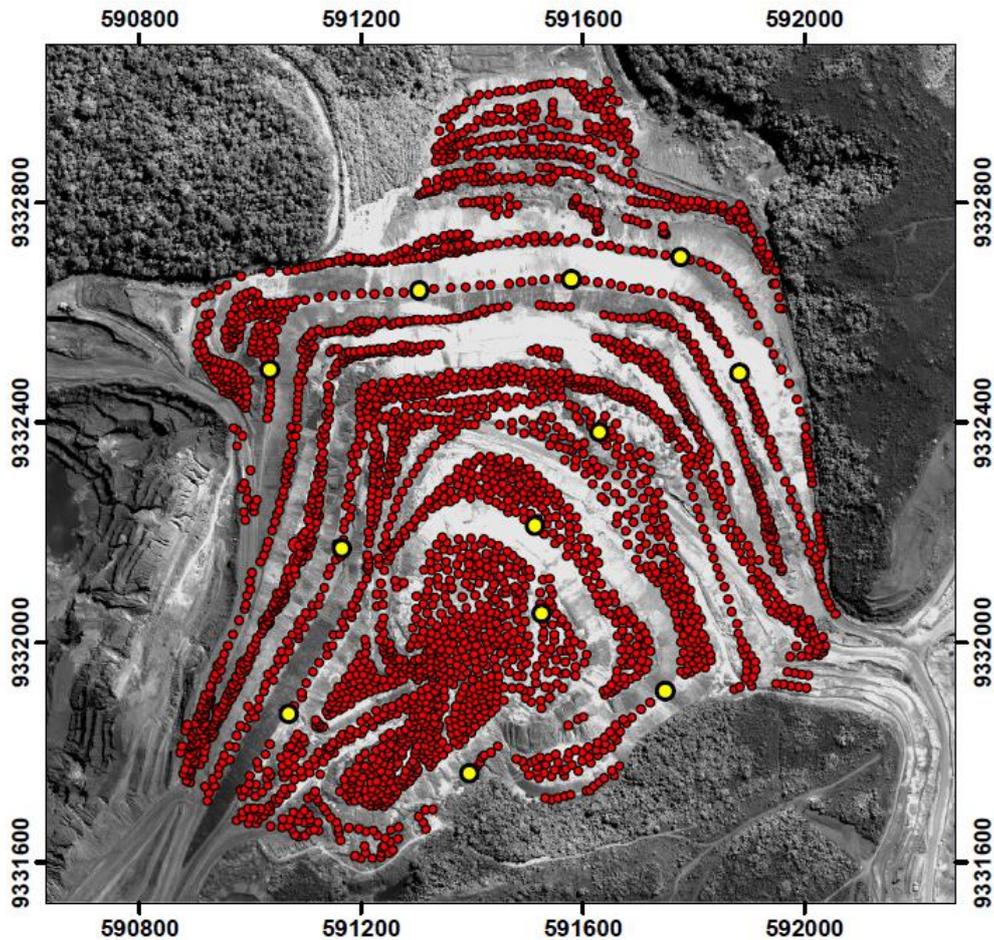


Figura 4.4 - Pontos de controle para análise dos MDE (em amarelo) sobre pontos referentes ao levantamento topográfico executado em 14/09/2012 (em vermelho).

As superfícies interpoladas foram baseadas no levantamento topográfico de 14/09/2012 e seus valores RMSE determinados constam na Tabela 4.3. Os interpoladores disponíveis são: Krigagem (*Kriging*), Inverso da distância (IDW), Vizinho mais próximo (*Natural neighbor*), Spline regular (*Spline regularized*) e tensionado (*Spline tension*), Topo to raster e Tendência linear (*Trend*). Maiores informações acerca de tais métodos podem ser encontradas em Childs (2004).

Tabela 4.3 - RMSE dos interpoladores analisados para determinação do MDE.

INTERPOLADOR	RMSE
NATURAL NEIGHBOR	1,099658
SPLINE REGULARIZED	1,517060
SPLINE TENSION	1,921029
KRIGING	2,410114
TOPO TO RASTER	2,555553
IDW	4,241889
TREND	24,77376

Observa-se que o menor valor de erro se refere ao interpolador *Natural neighbor*, selecionado, portanto, para determinação das superfícies matemáticas.

Sobre essas superfícies foram selecionados pontos cuja diferença altimétrica (deformação devida à movimentação) foi comparada com os valores de deformação resultantes das técnicas de processamento SAR. Destaca-se a relevância em selecionar pontos sobre regiões em que de fato houve alteração topográfica antrópica. Realizou-se então uma análise para determinar a equivalência estatística entre os valores de deformação provenientes das técnicas DInSAR-TS e *Intensity Tracking* e os provenientes dos dados topográficos.

A Figura 4.5 apresenta os pontos dos levantamentos topográficos de 31 de agosto (em azul) e 14 de setembro (em vermelho) de 2015. Observa-se que os pontos em vermelho indicam áreas que sofreram movimentação antrópica entre as datas. Os pontos em verde foram selecionados para realização do teste estatístico.

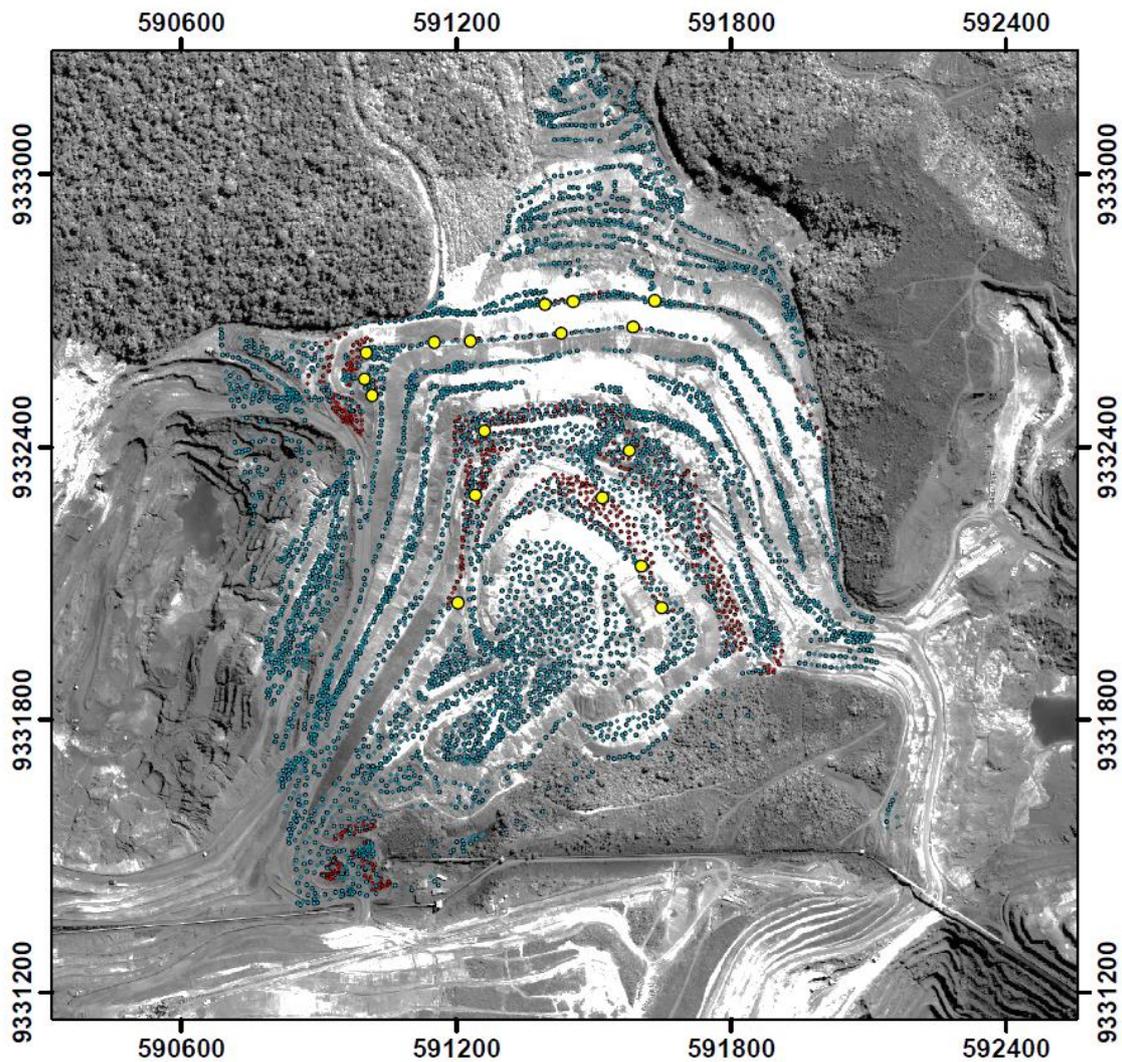


Figura 4.5 - Pontos referentes aos levantamentos topográficos realizados em 31 de agosto (azul) e em 14 de setembro (vermelho) e os selecionados para validação das técnicas (amarelo).

Portanto, efetuou-se a análise hipotética da igualdade entre as medidas amostrais das deformações obtidas a partir da técnica DInSAR-TS e do levantamento topográfico (hipótese nula) em contrapartida à diferença estatística das duas variáveis (hipótese alternativa). Em outras palavras, verificou-se se diferença entre as medidas amostrais das deformações obtidas pelos dois métodos era estatisticamente igual a zero. O mesmo procedimento foi realizado para a *Intensity Tracking*.

Em se tratando de uma amostra pequena (17 pontos) cujas propriedades não satisfaziam os critérios de aplicação de testes paramétricos, optou-se por aplicar o teste não-paramétrico T de Wilcoxon.

O teste T de Wilcoxon foi desenvolvido por F. Wilcoxon em 1945 e baseia-se nos postos das diferenças entre pares, sendo um método não-paramétrico para comparação de duas amostras pareadas. A princípio são calculados os valores numéricos da diferença entre cada par. Essas diferenças são ordenadas pelo seu valor absoluto, substituindo-se os valores originais pelo posto que ocupam na escala ordenada. O teste da hipótese de igualdade entre os grupos é baseado na soma dos postos das diferenças negativas e positivas. A prova de Wilcoxon dá um peso maior às diferenças grandes entre cada par de pontuações. O objetivo do teste dos sinais é comparar as performances de cada sujeito (ou pares de sujeitos) no sentido de verificar se existem diferenças significativas entre os seus resultados nas duas situações. A ideia é que se existirem apenas diferenças aleatórias, tal como é postulado pela hipótese nula, então haverá aproximadamente o mesmo número de ordens elevadas e de ordens inferiores tanto para as diferenças positivas como negativas. Caso se verifique uma preponderância de baixos resultados para um dos lados, isso significa a existência de muitos resultados elevados para o outro lado, indicando uma diferença em favor de uma das situações, superior àquilo que seria de esperar se os resultados se devessem ao acaso. Dado que a estatística W reflete o menor total de ordens, quanto menor for o valor de W , mais significativas serão as diferenças nas ordenações entre as duas situações. A regra de decisão é baseada no p-valor – proporção de vezes em que a estatística de teste com os aleatorizados é maior ou igual à estatística de teste com os dados do arranjo original. Se o p-valor for menor que o nível de significância, rejeita-se a hipótese nula (INE, 2012).

Destaca-se que embora seja mais adequada a utilização de um número maior de amostras para avaliação estatística, a necessidade de existência de resultados simultâneos pelas técnicas e topografia num mesmo local limitou este conjunto de 17 pontos.

A Figura 4.6 apresenta o local de estudo, abrangendo as pilhas de estéril NWI, W e SIV e respectivas regiões que sofreram alteração intencional. Pode-se observar graficamente que dentre as três pilhas de estéril, aquela que apresenta maior extensão alterada durante o período considerado é a NWI; entre outros fatores é a razão de seu maior enfoque ao longo da apresentação e discussão de resultados.

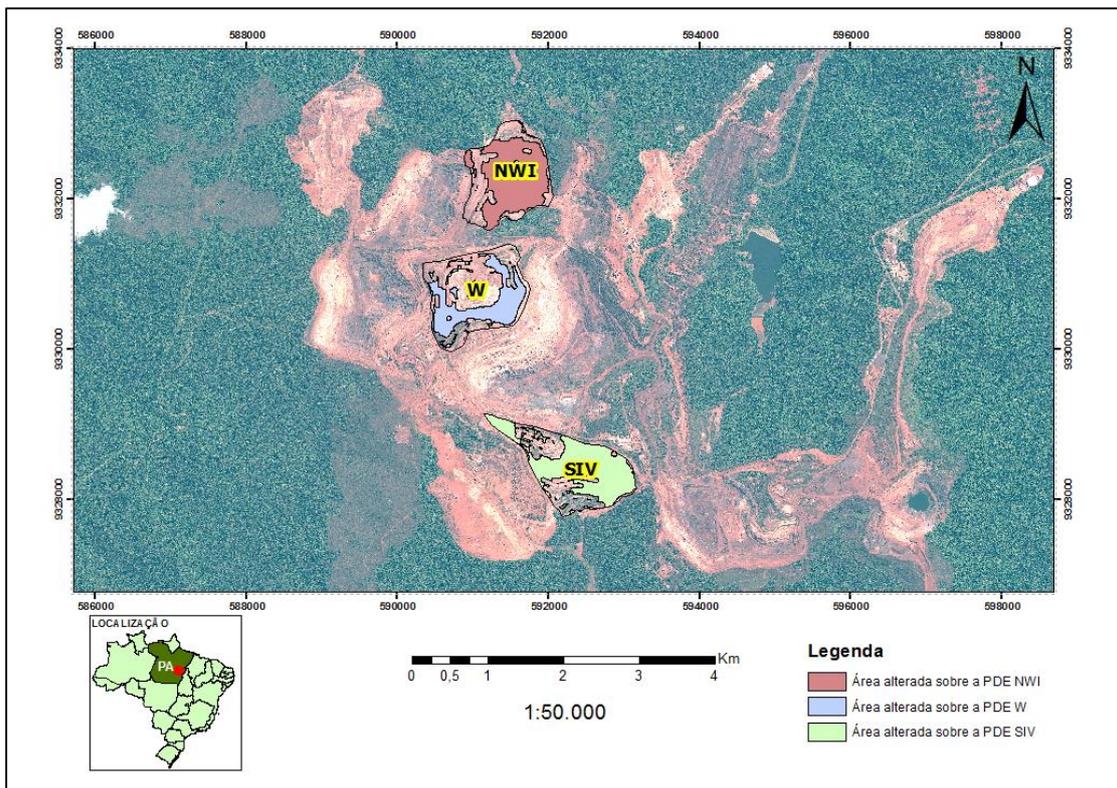


Figura 4.6 - Região de estudo com respectivas áreas que sofreram movimentação antrópica durante todo o período de aquisição das imagens.

4.2.3. Banco de dados

Para análise espacial conjunta dos resultados obtidos elaborou-se um banco de dados geográficos a partir do módulo ArcMap do software ArcGIS versão 10.0, configurado para o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 22 S, cuja base adotada foi a imagem ortorretificada GeoEye-1. O banco reúne os resultados de deformação obtidos pelas duas técnicas adotadas, imagens de coerência, dados topográficos e MDE.

5 RESULTADOS

5.1. Coerência

A Tabela 5.1 apresenta os valores de linhas de base perpendicular (Lp) e temporal (Lt) para os pares interferométricos gerados para o período completo de imagens e a coerência média sobre a área das PDEs para os 110 pares de imagens candidatos. Os pares selecionados para aplicação da técnica (melhores para cada grupo) DInSAR-TS estão em destaque.

Tabela 5.1 - Pares interferométricos candidatos para Lp de até a 800 m e Lt de até 45 dias e os selecionados (em destaque).

	Referência	Slave	Lp	Lt	Coerência
1		20120331	-157,36	11	0,57
2	20120320	20120411	-214,678	22	0,43
3		20120422	331,2457	33	0,35
4		20120503	-193,068	44	0,33
5		20120411	-57,3174	11	0,67
6	20120331	20120422	488,6059	22	0,45
7		20120503	-35,7077	33	0,42
8		20120514	180,193	44	0,22
9		20120422	545,9233	11	0,63
10	20120411	20120503	21,6097	22	0,53
11		20120514	237,5104	33	0,25
12		20120525	522,0116	44	0,36
13		20120503	-524,314	11	0,60
14	20120422	20120514	-308,413	22	0,28
15		20120525	-23,9117	33	0,46
16		20120605	-413,738	44	0,37
17		20120514	215,9007	11	0,53
18	20120503	20120525	500,4019	22	0,52
19		20120605	110,5754	33	0,48
20		20120616	-108,699	44	0,4
21	20120514	20120525	284,5012	11	0,43

continua

22		20120605	-105,325	22	0,35
23		20120616	-324,599	33	0,26
24		20120627	382,938	44	0,24
25		20120605	-389,827	11	0,69
26	20120525	20120616	-609,101	22	0,52
27		20120627	98,4368	33	0,51
28		20120708	-382,709	44	0,39
29		20120616	-219,274	11	0,71
30	20120605	20120627	488,2633	22	0,55
31		20120708	7,1172	33	0,48
32		20120719	-154,394	44	0,41
33		20120627	707,5373	11	0,68
34	20120616	20120708	226,3912	22	0,59
35		20120719	64,8796	33	0,5
36		20120730	502,6248	44	0,39
37		20120708	-481,146	11	0,7
38	20120627	20120719	-642,658	22	0,5
39		20120730	-204,913	33	0,47
40		20120810	-90,8571	44	0,42
41		20120719	-161,512	11	0,69
42	20120708	20120730	276,2336	22	0,57
43		20120810	390,289	33	0,48
44		20120821	-119,505	44	0,44
45		20120730	437,7452	11	0,72
46	20120719	20120810	551,8006	22	0,58
47		20120821	42,0069	33	0,54
48		20120901	83,7963	44	0,49
49		20120810	114,0554	11	0,83
50	20120730	20120821	-395,738	22	0,64
51		20120901	-353,949	33	0,55
52		20120912	-428,695	44	0,49
53	20120810	20120821	-509,794	11	0,76
54		20120901	-468,004	22	0,63

Tabela 5.1 - continuação

55		20120912	-542,75	33	0,55
56		20120923	-83,2526	44	0,55
57		20120901	41,7894	11	0,8
58	20120821	20120912	-32,9564	22	0,71
59		20120923	426,5411	33	0,59
60		20121004	284,9202	44	0,44
61		20120912	-74,7458	11	0,86
62	20120901	20120923	384,7517	22	0,73
63		20121004	243,1308	33	0,52
64		20121015	436,6229	44	0,33
65		20120923	459,4975	11	0,82
66	20120912	20121004	317,8766	22	0,57
67		20121015	511,3687	33	0,34
68		20121026	500,758	44	0,34
69		20121004	-141,621	11	0,67
70	20120923	20121015	51,8712	22	0,41
71		20121026	41,2605	33	0,39
72		20121106	-507,268	44	0,29
73		20121015	193,4921	11	0,49
74	20121004	20121026	182,8814	22	0,46
75		20121106	-365,647	33	0,3
76		20121117	53,077	44	0,37
77		20121026	-10,6107	11	0,81
78	20121015	20121106	-559,139	22	0,32
79		20121117	-140,415	33	0,51
80		20121128	-255,827	44	0,42
81		20121106	-548,529	11	0,57
82	20121026	20121117	-129,804	22	0,56
83		20121128	-245,217	33	0,43
84		20121209	-297,009	44	0,34
85		20121117	418,7243	11	0,44
86	20121106	20121128	303,3121	22	0,31
87		20121209	251,5198	33	0,3

continua

Tabela 5.1 - Conclusão

88		20121220	421,7402	44	0,29
89		20121128	-115,412	11	0,66
90	20121117	20121209	-167,205	22	0,42
91		20121220	3,0159	33	0,39
92		20121209	-51,7923	11	0,53
93	20121128	20121220	118,4281	22	0,44
94		20130111	-81,0899	44	0,33
95		20121220	170,2204	11	0,67
96	20121209	20130111	-29,2976	33	0,39
97		20130122	-161,335	44	0,34
98		20130111	-199,518	22	0,41
99	20121220	20130122	-331,555	33	0,35
100		20130202	-153,992	44	0,33
101	20130111	20130122	-132,037	11	0,69
102		20130202	45,5262	22	0,51
103	20130122	20130202	177,5634	11	0,61
104	20130202	20130318	1,4283	44	0,38
105		20130329	220,0586	11	0,52
106	20130318	20130409	262,6863	22	0,38
107		20130420	121,9402	33	0,36
108	20130329	20130409	42,6277	11	0,57
109		20130420	-98,1184	22	0,45
110	20130409	20130420	-140,746	11	0,62

Observa-se a partir da Tabela 5.1 que os valores de coerência mais altos foram encontrados nos pares de imagens consecutivas. Isto significa que nem sempre a menor linha de base garante a maior coerência. No caso de regiões tropicais com aquisições na banda X, o intervalo de tempo é o fator mais determinante. Os pares 98 e 104 apresentam falhas na sequência de aquisições. A Figura 5.1 apresenta graficamente os valores de coerência dos pares selecionados relacionando as dimensões de suas linhas de base perpendicular.

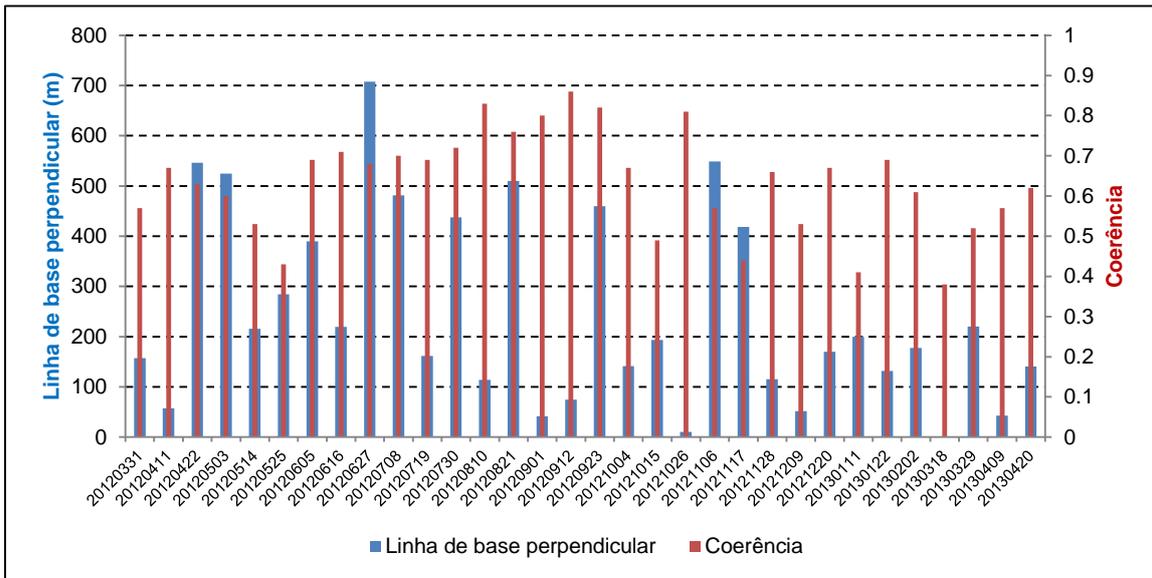


Figura 5.1 - Comparação entre coerência interferométrica e linhas de base perpendicular (Lp) dos pares seleccionados.

Na Figura 5.2 as linhas de base referentes aos pares seleccionados estão em vermelho, as conexões em verde referem-se àqueles cuja coerência média apresentaram-se inferiores às seleccionadas e as barras em cinza representam os intervalos de 22 e 44 dias em que ocorreram falhas nas aquisições, respectivamente.

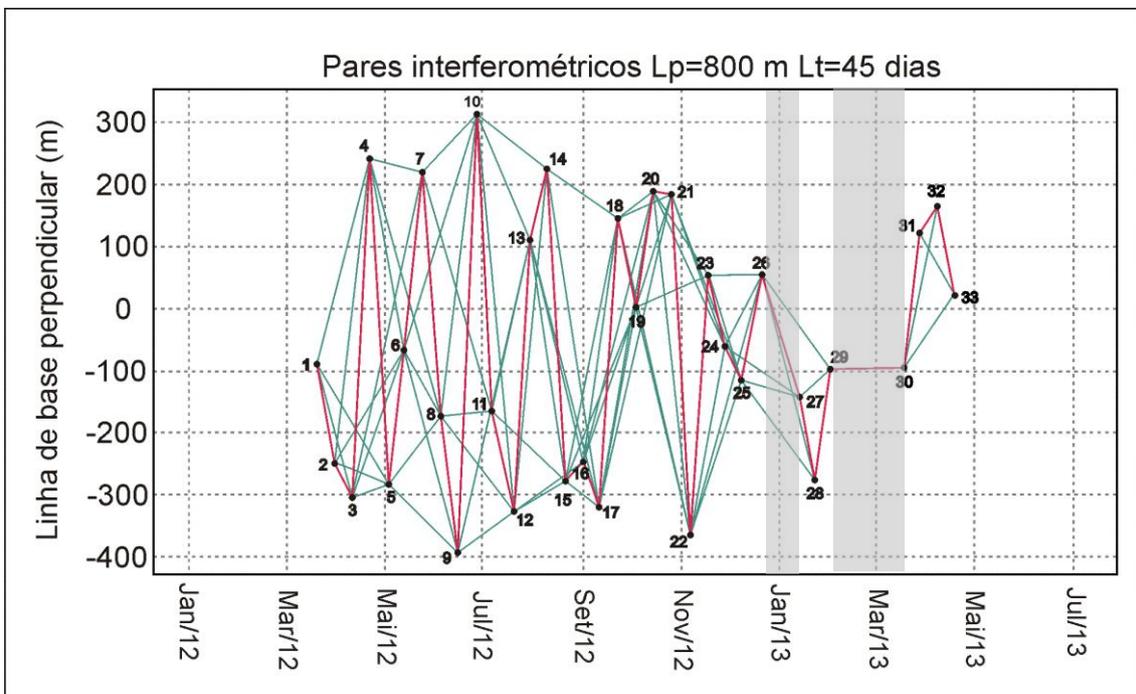


Figura 5.2 – Linhas de base dos pares interferométricos seleccionados (em vermelho) e descartados (em verde).

A Figura 5.3 exibe os valores médios de coerência dos 110 pares candidatos sobre as PDEs comparativamente aos índices de pluviosidade para o período.

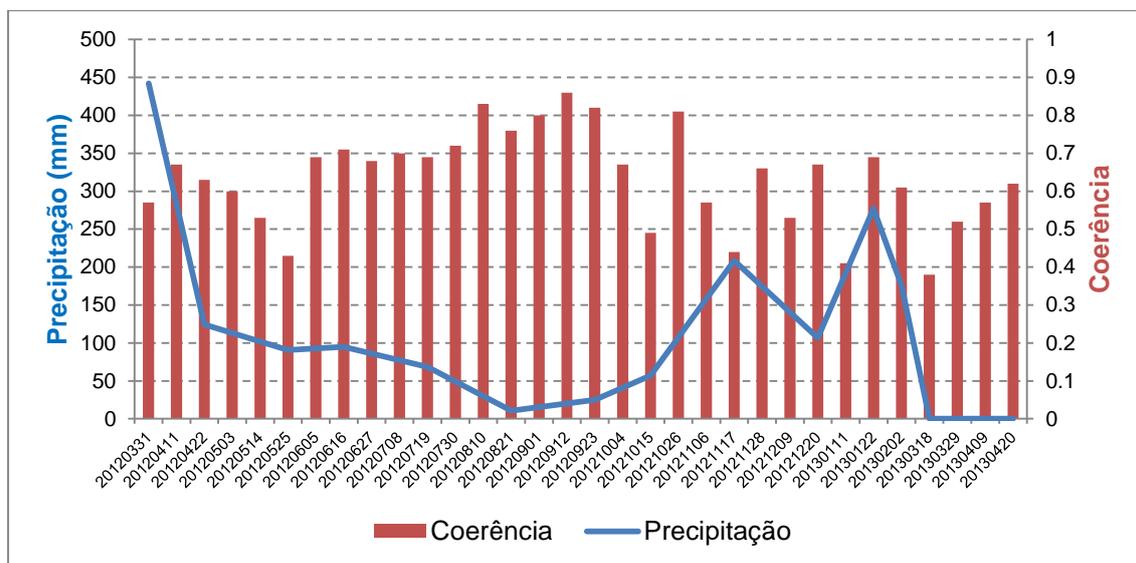


Figura 5.3 - Comparação entre coerência interferométrica sobre as PDEs e índices pluviométricos dos pares selecionados.

A Tabela 5.2 apresenta os valores médios de coerência sobre as regiões da PDE com ausência ou escassez de resultados da técnica DInSAR-TS e os valores de coerência do refletor de canto (ilustrados na Figura 5.4) para os 32 pares de estudo.

Tabela 5.2 - Coerência média para regiões com ausência ou escassez de medidas DInSAR-TS (com maior valor em destaque) em comparação à resposta do refletor de canto.

Referência	Slave	Coerência da região sem medidas DInSAR-TS	Coerência do refletor de canto
20120320	20120331	0,41	0,82
20120331	20120411	0,49	0,95
20120411	20120422	0,48	0,82
20120422	20120503	0,47	0,74
20120503	20120514	0,32	0,87
20120514	20120525	0,33	0,89
20120525	20120605	0,51	0,86
20120605	20120616	0,51	0,84
20120616	20120627	0,46	0,79
20120627	20120708	0,46	0,77
20120708	20120719	0,41	0,94
20120719	20120730	0,49	0,85
20120730	20120810	0,61	0,97
20120810	20120821	0,54	0,87

Tabela 5.2 - conclusão

20120821	20120901	0,54	0,92
20120901	20120912	0,67	0,93
20120912	20120923	0,66	0,92
20120923	20121004	0,48	0,94
20121004	20121015	0,3	0,82
20121015	20121026	0,57	0,90
20121026	20121106	0,34	0,71
20121106	20121117	0,29	0,73
20121117	20121128	0,41	0,87
20121128	20121209	0,29	0,92
20121209	20121220	0,45	0,87
20121220	20130111	0,27	0,85
20130111	20130122	0,43	0,91
20130122	20130202	0,39	0,90
20130202	20130318	0,26	0,79
20130318	20130329	0,36	0,91
20130329	20130409	0,41	0,93
20130409	20130420	0,48	0,94

A Figura 5.4 apresenta a coerência do refletor de canto ao longo dos 32 pares de imagens selecionados.

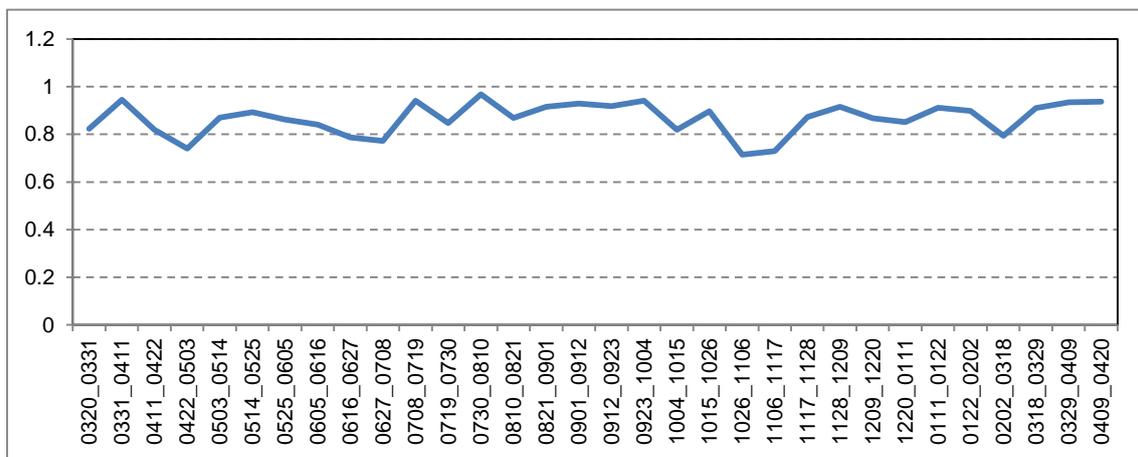


Figura 5.4 - Valores de coerência do refletor de canto.

5.2. DInSAR Time-series

Como mencionado no capítulo 4.2, para processamento da técnica DInSAR-TS, as imagens foram divididas em dois períodos – seco e chuvoso. No entanto, foi também realizado o processamento para o conjunto completo de imagens, a fim de averiguar a influência da sazonalidade nos resultados.

A Figura 5.5 apresenta as áreas da PDEs NWI, W e SIV em que não houve movimentação antrópica durante o período entre 20 de março de 2012 e 20 de abril de 2013 (Figura 5.5) para comparação dos períodos.

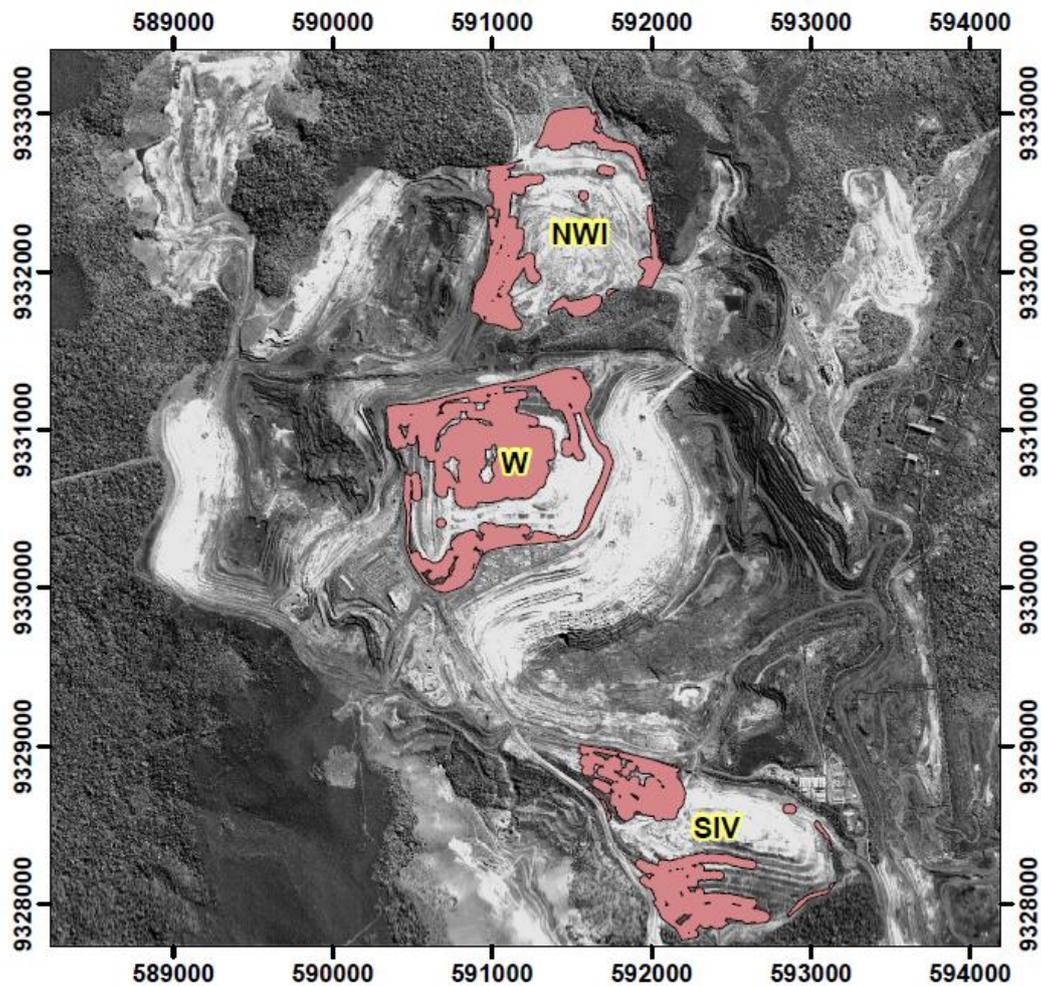


Figura 5.5 - Áreas sem movimentação antrópica sobre as PDEs (em vermelho) entre 20 de março de 2012 e 20 de abril de 2013.

5.2.1. Período seco

A Figura 5.6 apresenta os mapas de deformação pela técnica DInSAR-TS para o período seco, cujo mapa final de deformação está ilustrado na Figura 5.7.

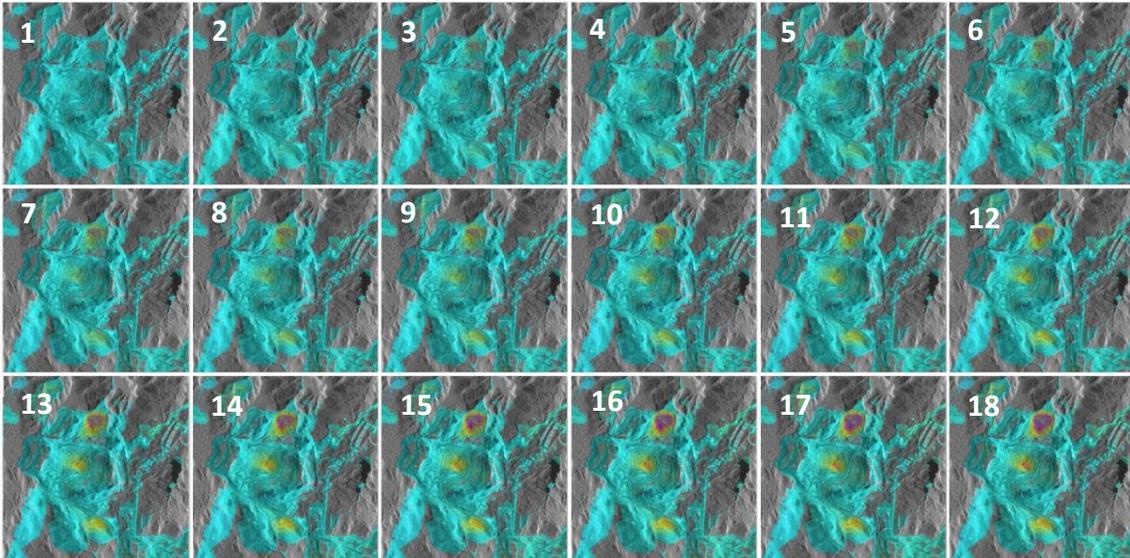


Figura 5.6 - Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS.

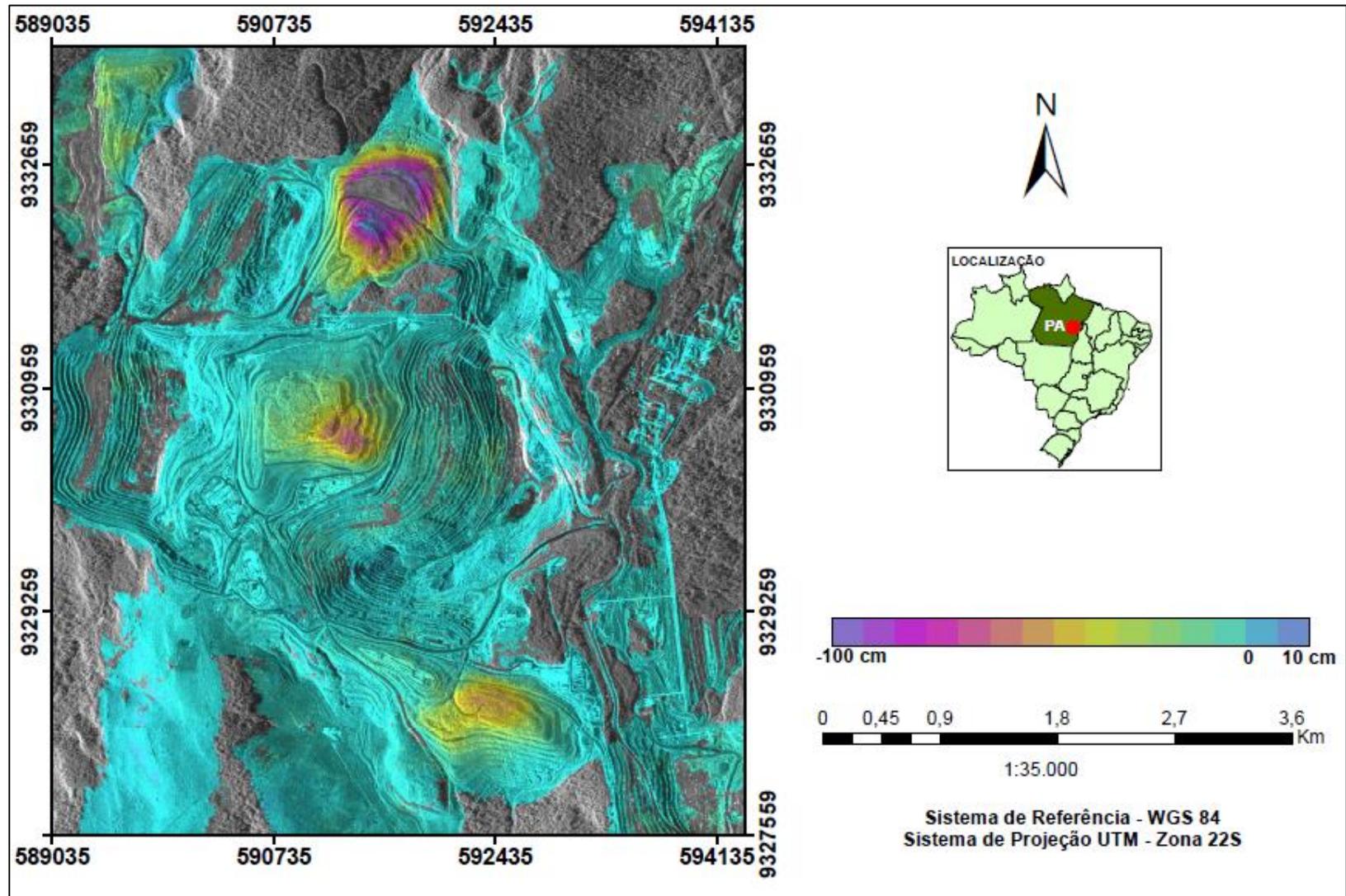


Figura 5.7 - Mapa de deformação final para o período seco pela DInSAR-TS.

A Figura 5.8 apresenta o ponto P1 em detalhe do mapa final para o período seco sobre a PDE W e sua deformação temporal.

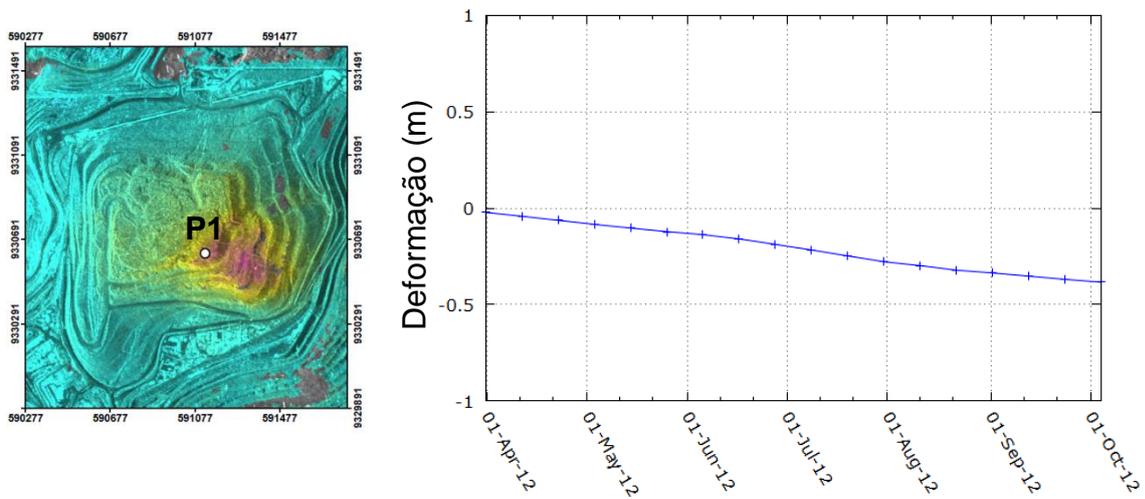


Figura 5.8 - Deformação temporal para o período seco sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.

5.2.2. Período chuvoso

A Figura 5.9 apresenta os mapas de deformação pela técnica DInSAR-TS para o período chuvoso, cujo mapa final de deformação encontra-se ilustrado na Figura 5.10.

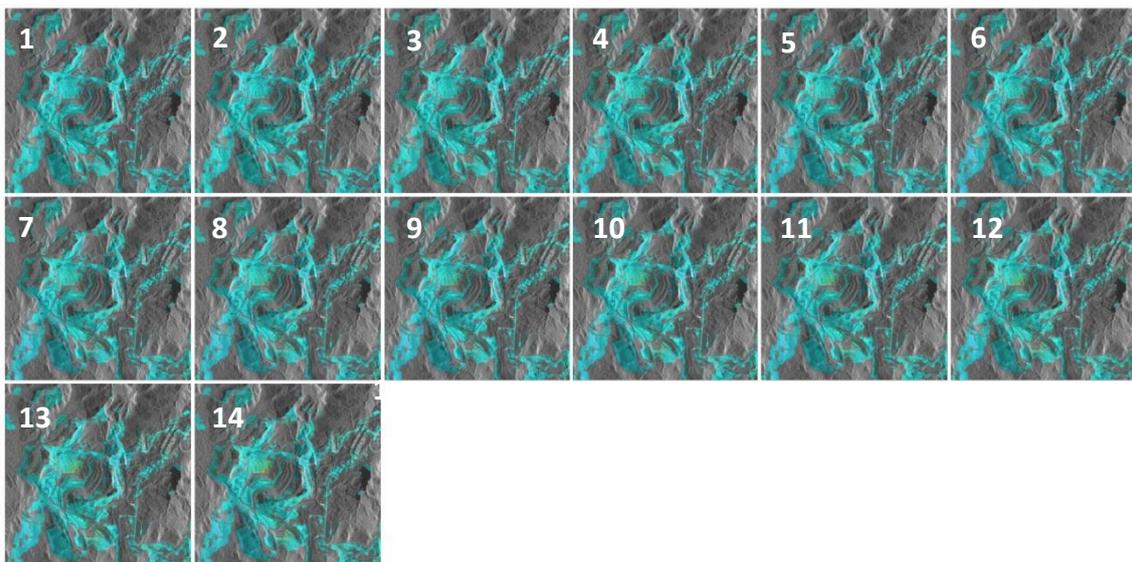


Figura 5.9 - Mapas de deformação temporal para o período chuvoso pela DInSAR-TS.

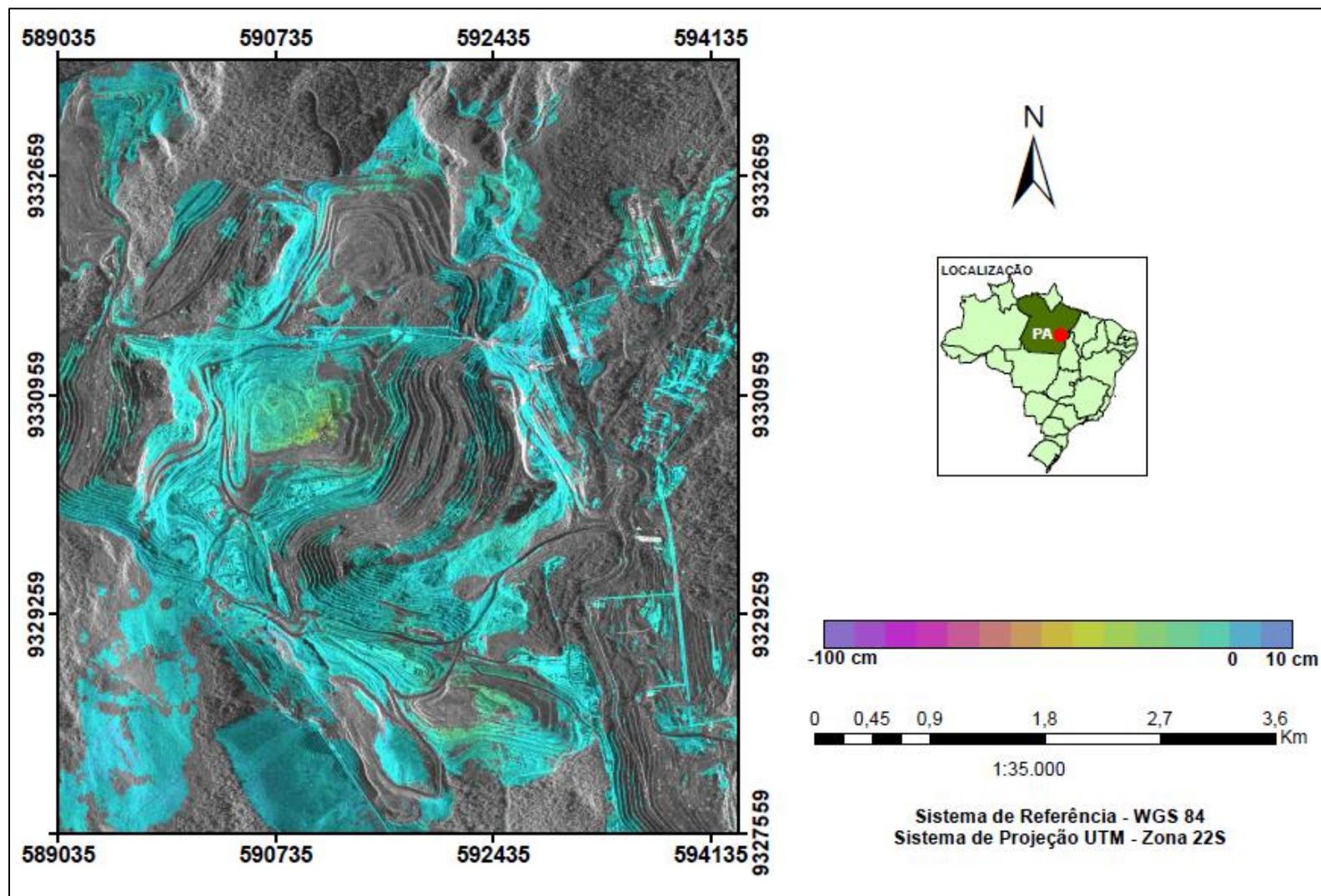


Figura 5.10 - Mapa de deformação final para o período chuvoso pela DInSAR-TS.

A Figura 5.11 apresenta o ponto P1 em detalhe do mapa final para o período chuvoso sobre a PDE W e sua deformação temporal.

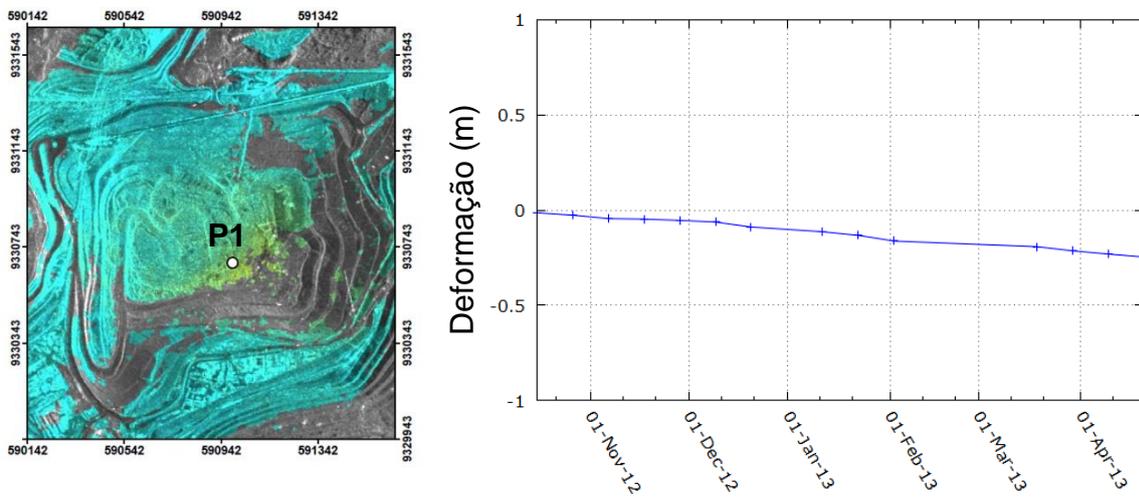


Figura 5.11 - Deformação temporal para o período chuvoso sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.

5.2.3. Período completo

A Figura 5.12 apresenta os mapas de deformação pela técnica DInSAR-TS para o período completo das imagens, cujo mapa final de deformação encontra-se ilustrado na Figura 5.13.

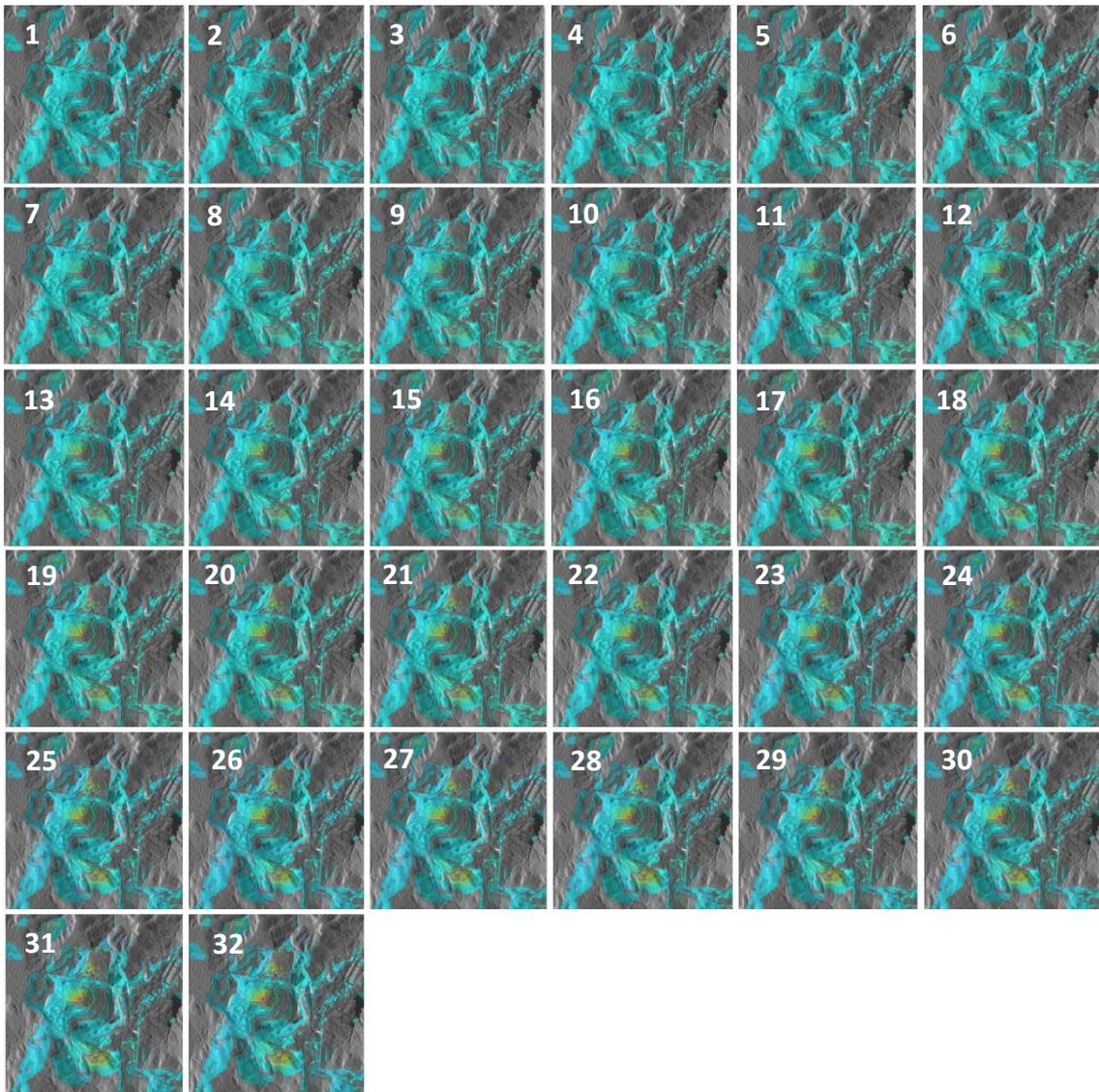


Figura 5.12 - Mapas de deformação temporal para o período completo pela DInSAR-TS.

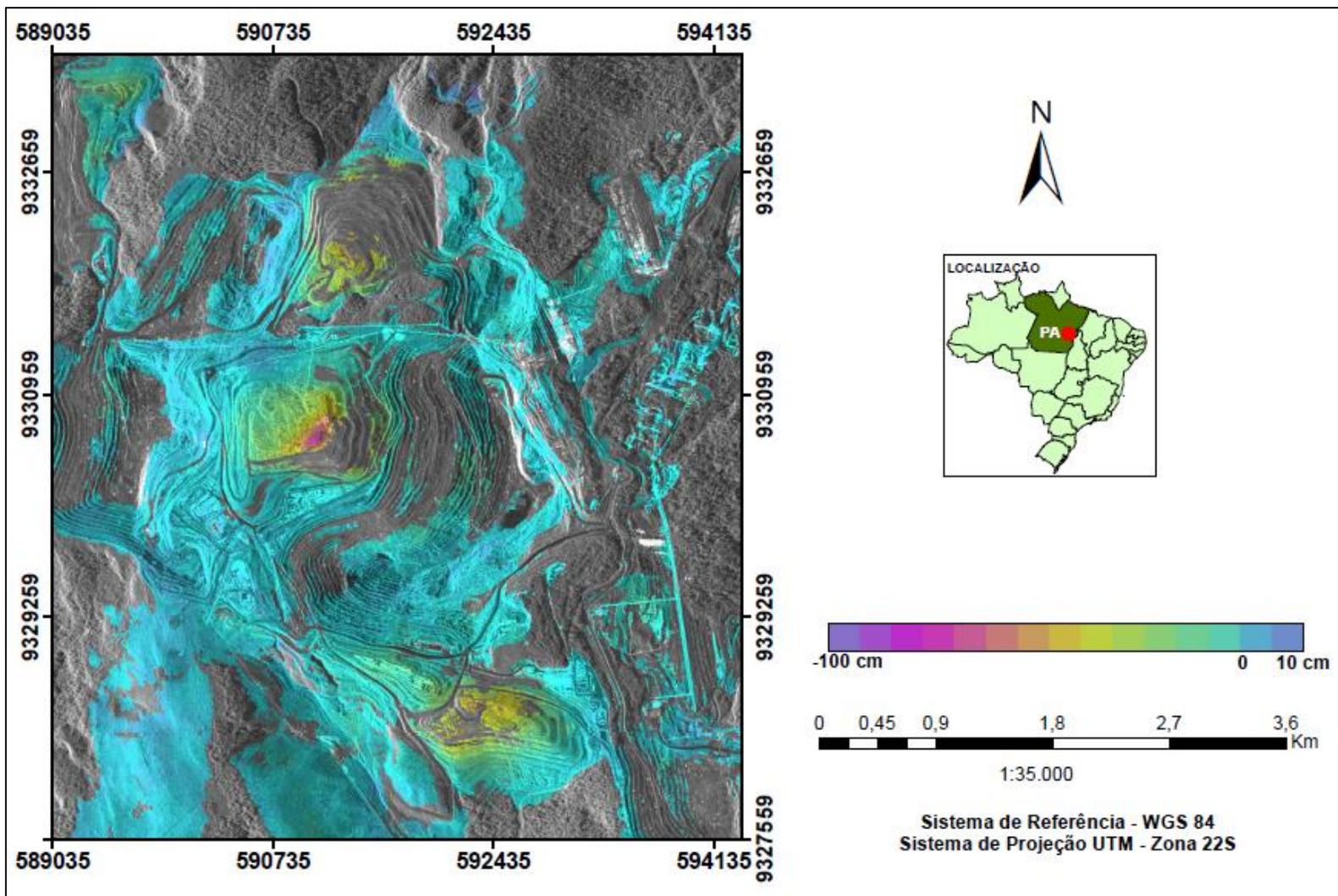


Figura 5.13 - Mapa de deformação final para o período completo pela DInSAR-TS.

A Figura 5.14 apresenta o ponto P1 em detalhe do mapa final para o período completo sobre a PDE W e sua deformação temporal.

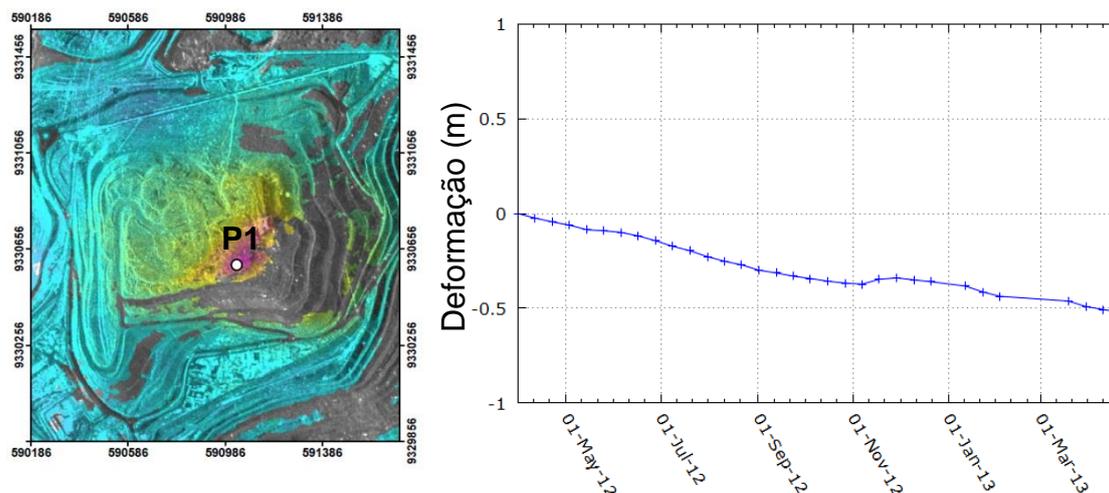


Figura 5.14 - Deformação temporal para o período completo sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.

Os valores de deformação mínima, média e máxima para as PDEs podem ser conferidos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de deformação das PDEs para os três conjuntos de imagens.

	PDE NWI (m)			PDE W (m)			PDE SIV (m)		
	mín	méd	máx	mín	méd	máx	mín	méd	máx
Período seco	-0,71	-0,17	0,03	-0,53	-0,12	0,02	-0,37	-0,13	0,01
Período chuvoso	-0,17	-0,02	0,08	-0,29	-0,05	0,04	-0,18	-0,04	0,05
Período completo	-0,47	-0,09	0,12	-0,64	-0,10	0,09	-0,48	-0,10	0,06

5.3. INTENSITY TRACKING

A Figura 5.15 ilustra as regiões das PDEs com ausência ou escassez de resultados de deformação pela técnica DInSAR-TS, polígonos extraídos da Figura 5.13, a partir de cujos valores médios de coerência foi selecionado o par de imagens para aplicação da *Intensity Tracking*, em destaque na Tabela 5.2. As imagens 20120901 e 20120912 foram escolhidas devido à sua alta correlação e correspondência das datas com os levantamentos topográficos. Observa-se ainda que a coerência do refletor de canto para o par selecionado está entre as mais elevadas, o que confirma a qualidade das imagens para aplicação da técnica.

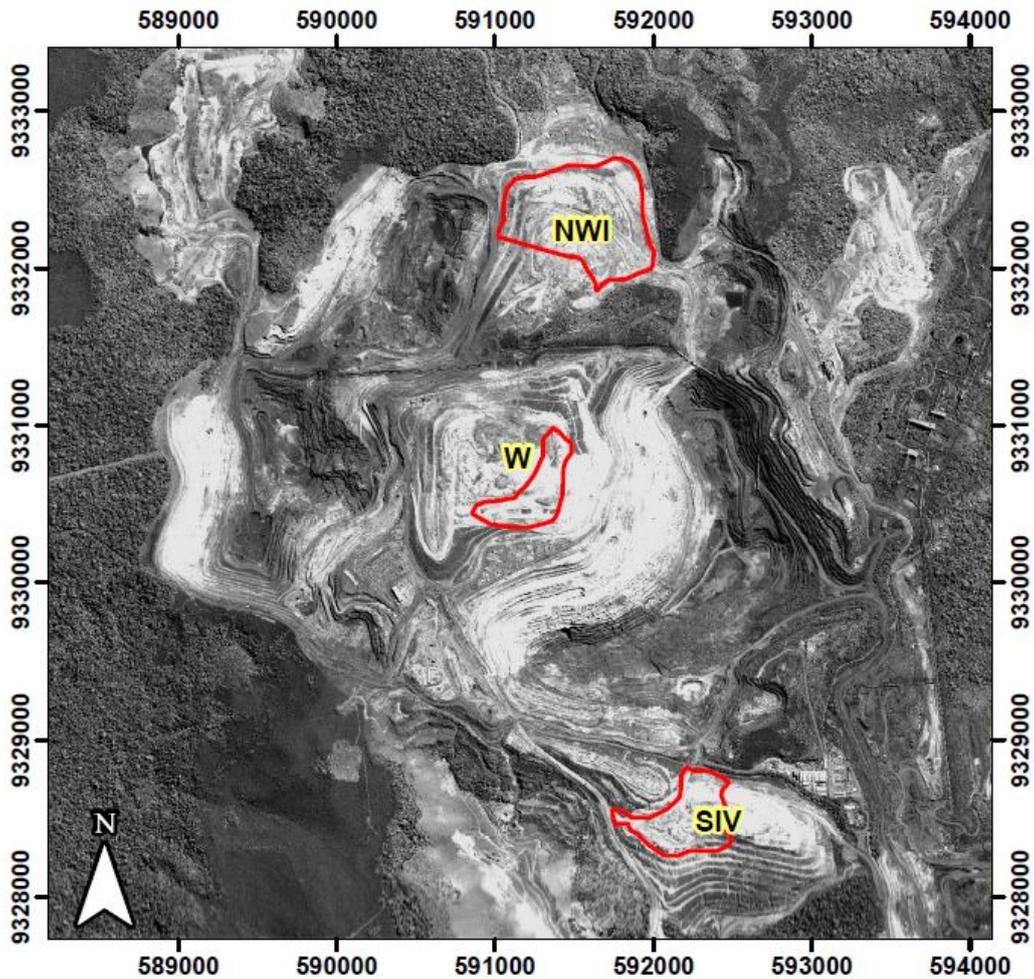


Figura 5.15 - Regiões sobre as PDEs com ausência ou escassez de resultados DInSAR-TS (polígonos em vermelho).

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam os mapas de deformação obtidos pela técnica *Intensity Tracking* nas direções de *range* e azimuth, respectivamente, na linha de visada do sensor (LoS) para o par de imagens 20120901_20120912. Os resultados da técnica concentram-se sobre as PDEs, uma vez que as áreas em seu entorno apresentam valores discrepantes de deformação em função da vegetação e de atividades antrópicas.

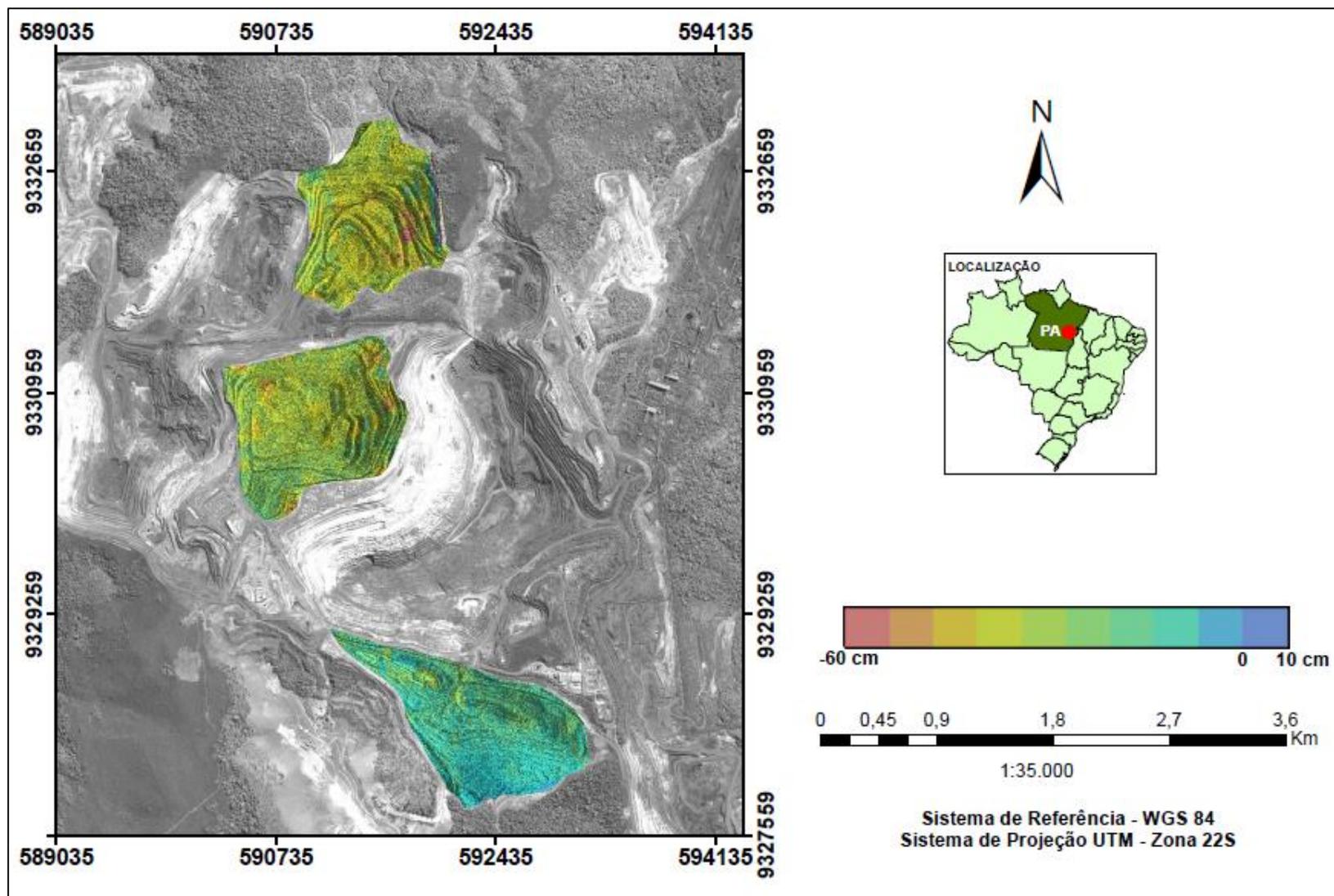


Figura 5.16 - Mapa de deformação em *range* sobre as PDEs para o par 20120901_20120912 pela *Intensity Tracking* 64x64 pixels.

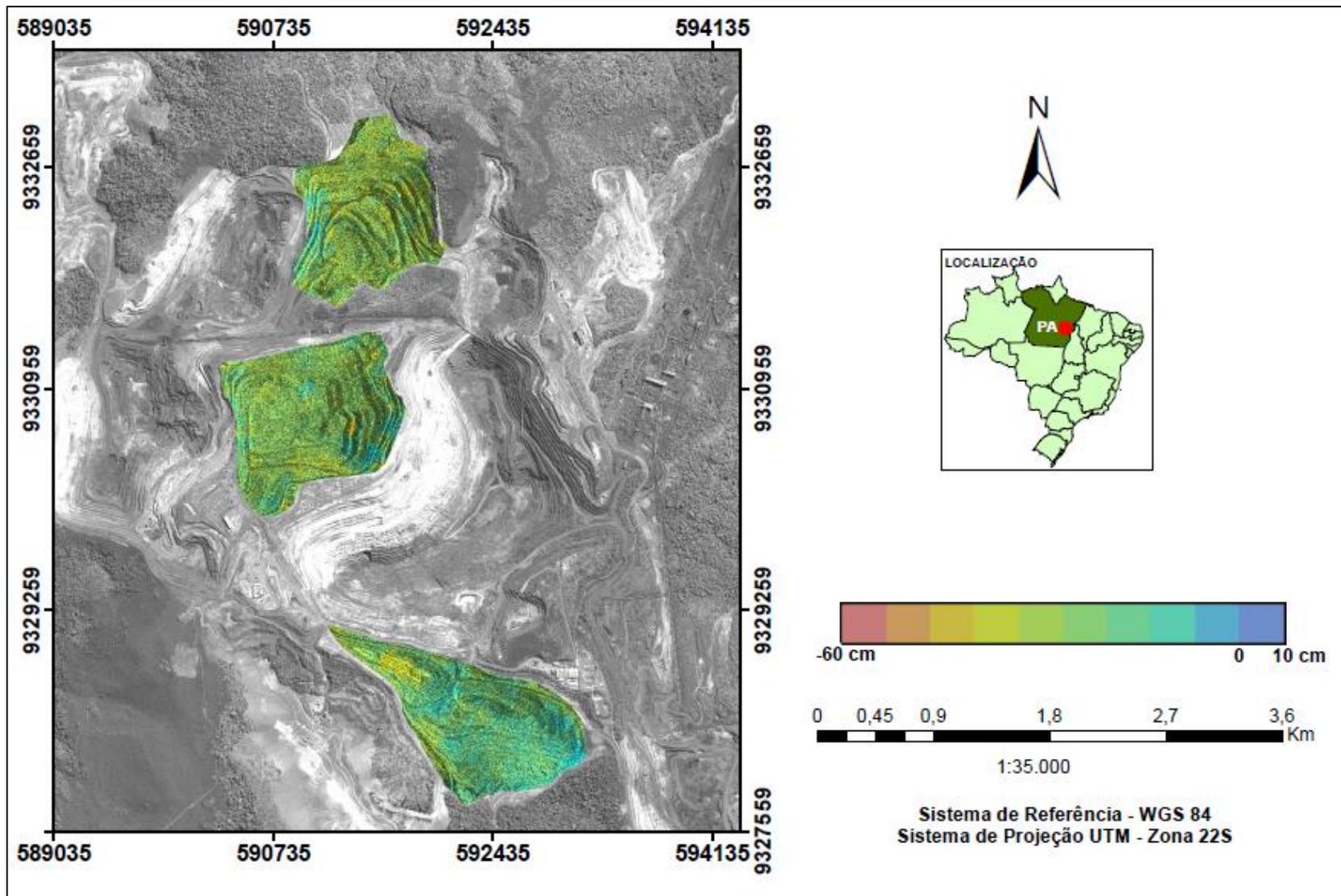


Figura 5.17 - Mapa de deformação em azimute sobre as PDEs para o par 20120901_20120912 pela *Intensity Tracking* 64x64 pixels.

As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam o ponto P1 em detalhe do mapa final de deformação para os dez primeiros pares de imagens sobre a PDE W e sua deformação temporal.

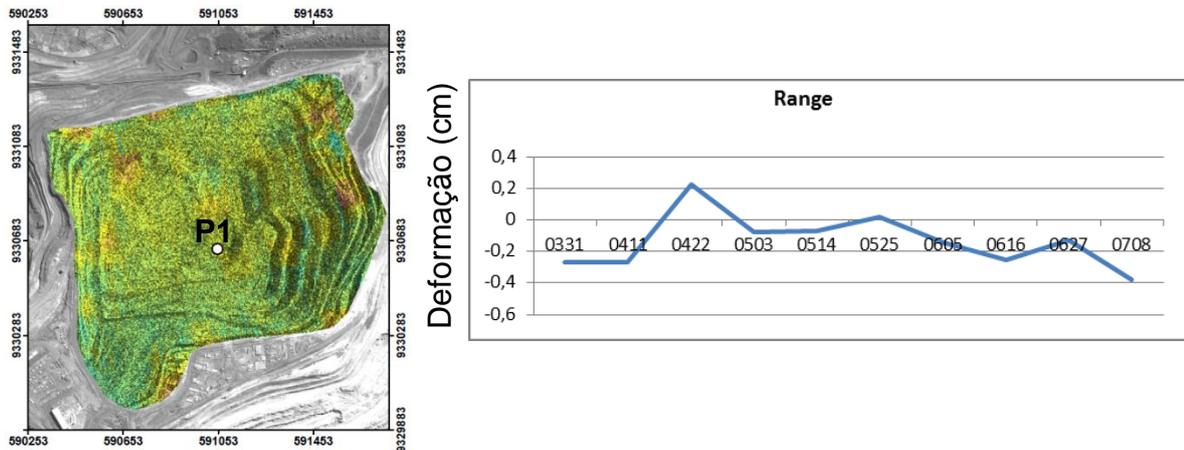


Figura 5.18 - Deformação temporal em *range* entre março e julho de 2012 sob o ponto P1 pela *Intensity Tracking* 64x64.

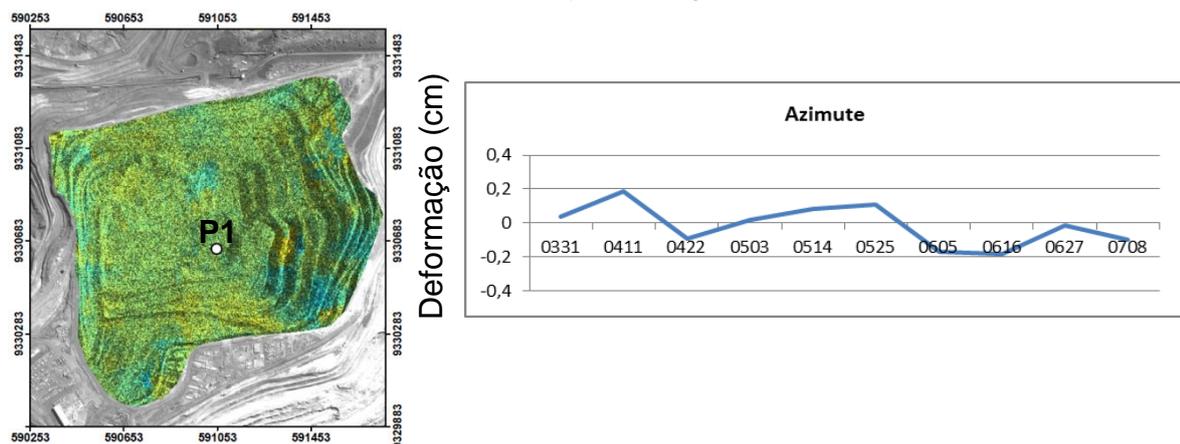


Figura 5.19 - Deformação temporal em azimute entre março e julho de 2012 sob o ponto P1 pela *Intensity Tracking* 64x64.

5.4. VALIDAÇÃO

Os resultados obtidos pelas técnicas DInSAR-TS e *Intensity Tracking* foram comparados com os dados *Speckle Tracking* e dados topográficos disponíveis, para que fosse possível estabelecer um grau de acurácia das técnicas. A Figura 5.20 exibe a comparação da deformação superficial entre os resultados obtidos pela DInSAR-TS, *Intensity Tracking* com janela de busca na correlação cruzada quadrada de 32 pixels (IT 32x32), 64 pixels (IT 64x64), 128 pixels (IT 128x128) – conforme recomendação de GAMMA (2013) – e os dados *Speckle Tracking* (ST) entre 20 de março

e 08 de julho de 2012 para o perfil AB ilustrado na Figura 4.3. Os resultados *Intensity Tracking* referem-se à deformação acumulada dos pares de imagens intervalados em 11 dias.

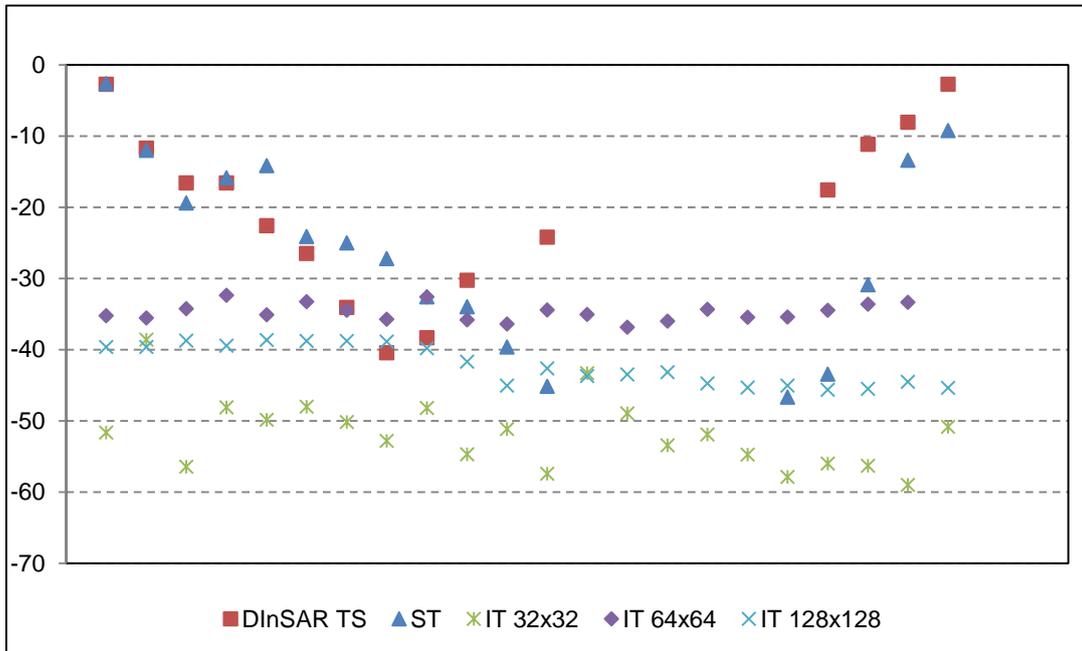


Figura 5.20 - Resultados de deformação em LoS (cm) do perfil AB para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

A Figura 5.21 apresenta a deformação superficial do perfil AB considerando-se o intervalo de 11 dias entre o par de imagens (a), aproximadamente 1 mês entre o par de imagens (b), aproximadamente 2 meses (c) e aproximadamente 3 meses (d) para verificação da influência do período entre as aquisições das imagens nos resultados obtidos.

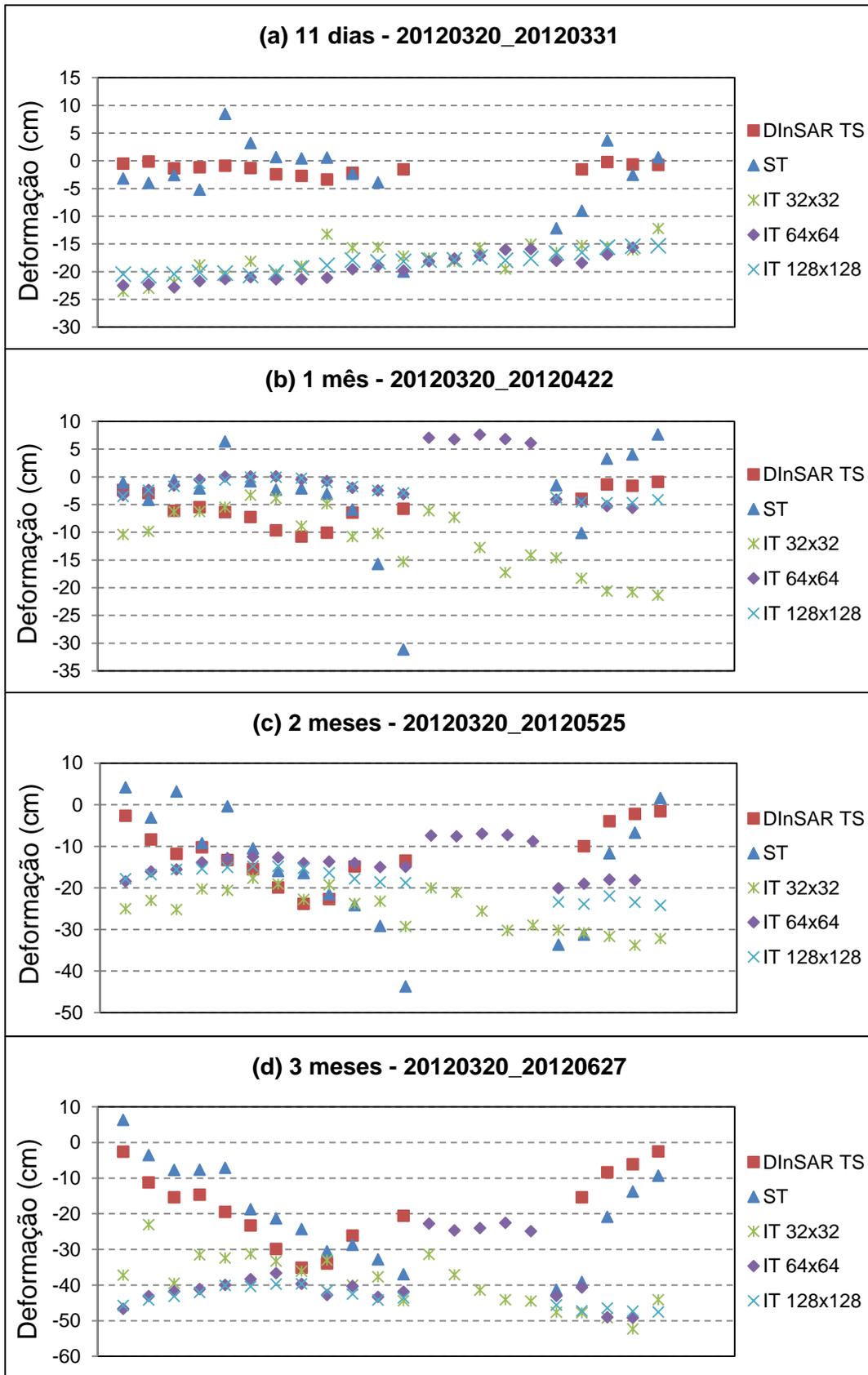


Figura 5.21 - Deformação superficial para o perfil AB para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* com intervalos de 11 dias (a), 33 dias (b), 66 dias (c) e 99 dias (d).

A Figura 5.22 ilustra o posicionamento dos pontos 54 e 118 utilizados nas análises de deformação temporal, cujos resultados são apresentados nas Figuras 5.23 e 5.25, respectivamente, a partir das técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* ao longo das imagens 20120320 a 20120708 realizada par a par com intervalo de 11 dias. As altitudes dos pontos foram obtidas a partir do MDE. Os pontos foram selecionados sobre uma região em que não houve movimentação antrópica do solo relatada no período mencionado, de acordo com os dados topográficos fornecidos pela Vale S. A., entretanto podem ter havido alterações superficiais devido à compactação de material por tráfego de veículos e crescimento de vegetação, o que certamente pode afetar os resultados. As Figuras 5.24 e 5.26 apresentam suas respectivas tendências lineares temporais das deformações.

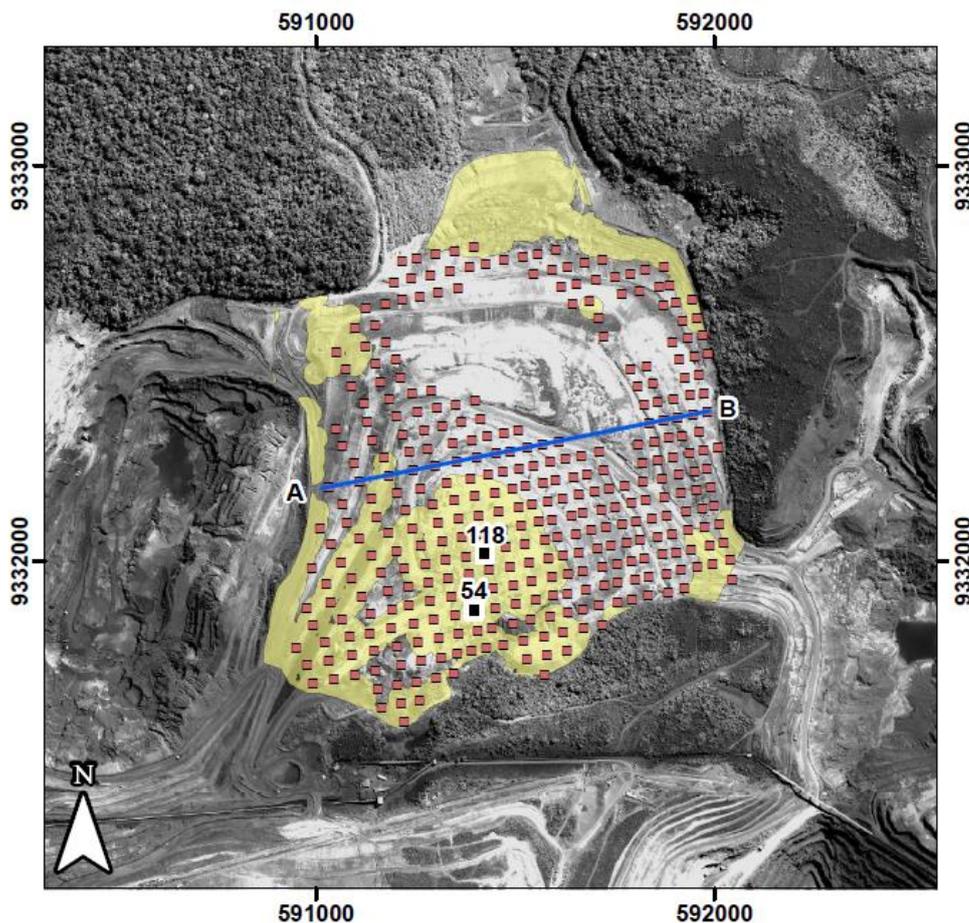


Figura 5.22 - Pontos 54 e 118 selecionados a partir da *Speckle Tracking* (em rosa) sobre área sem movimentação antrópica (amarelo) entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

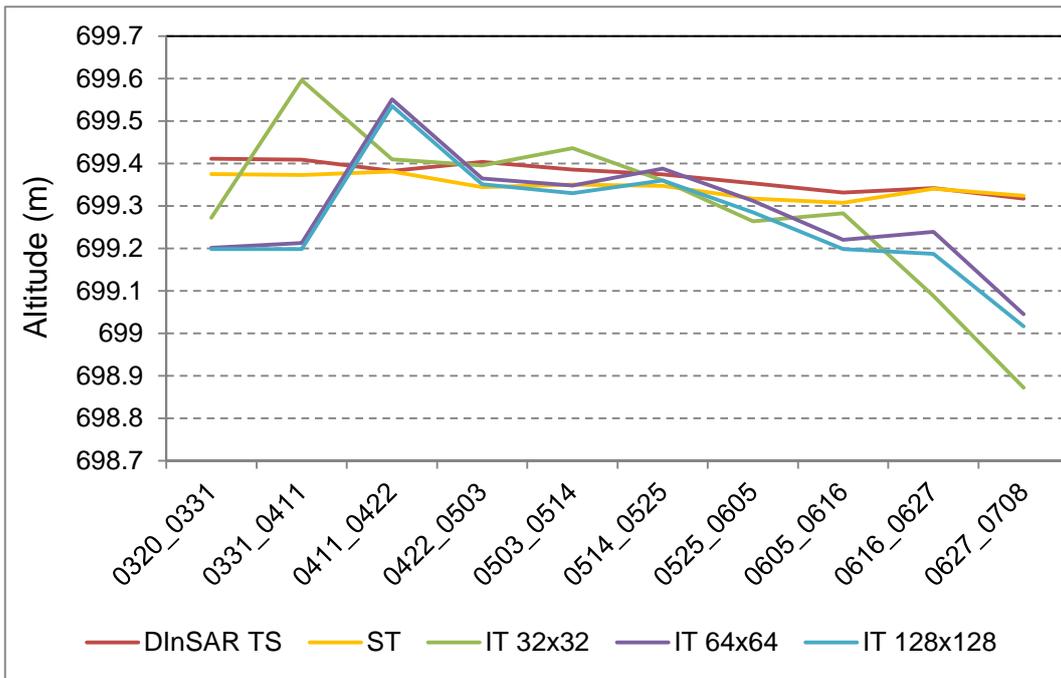


Figura 5.23 - Comportamento temporal da altitude do ponto 54 para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

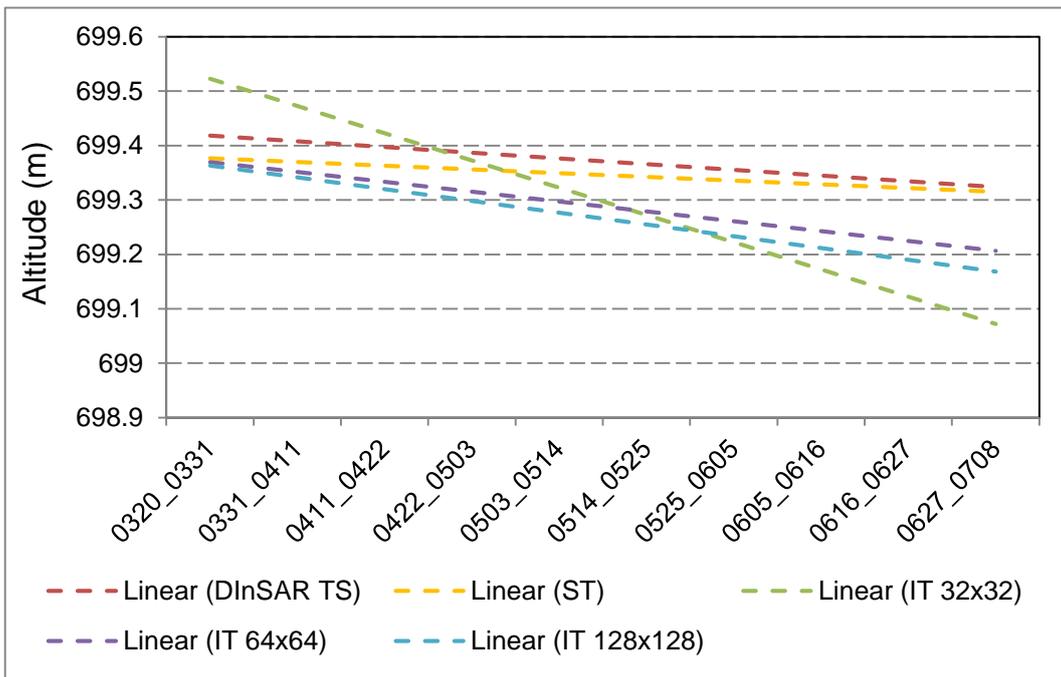


Figura 5.24 - Tendência linear da deformação temporal do ponto 54 para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

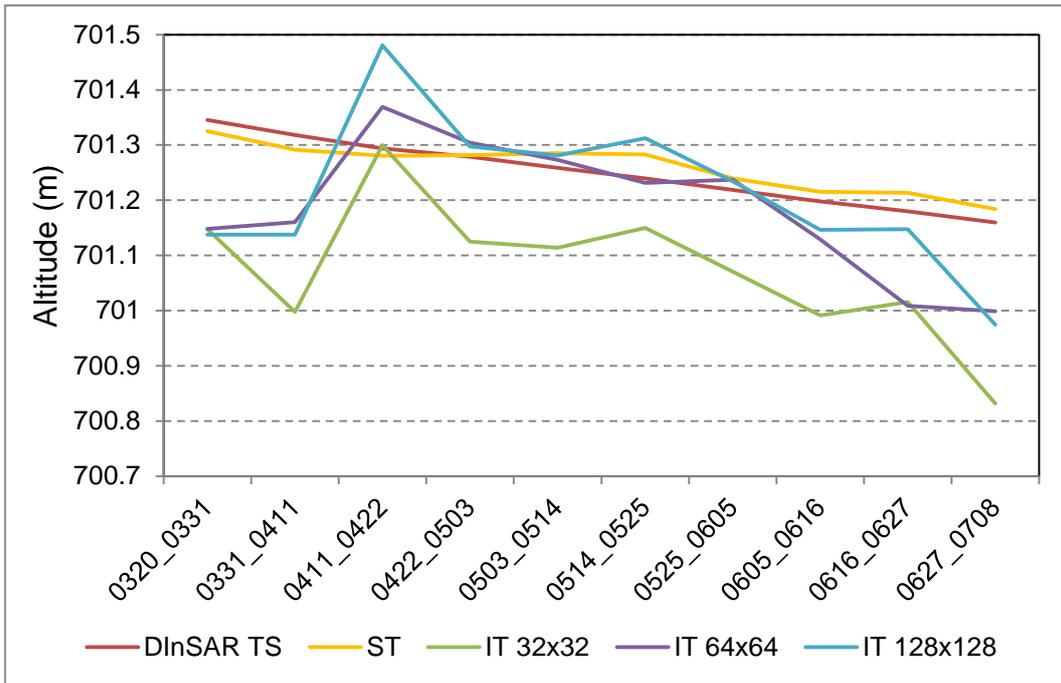


Figura 5.25 - Deformação temporal da altitude do ponto 118 (em metros) para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

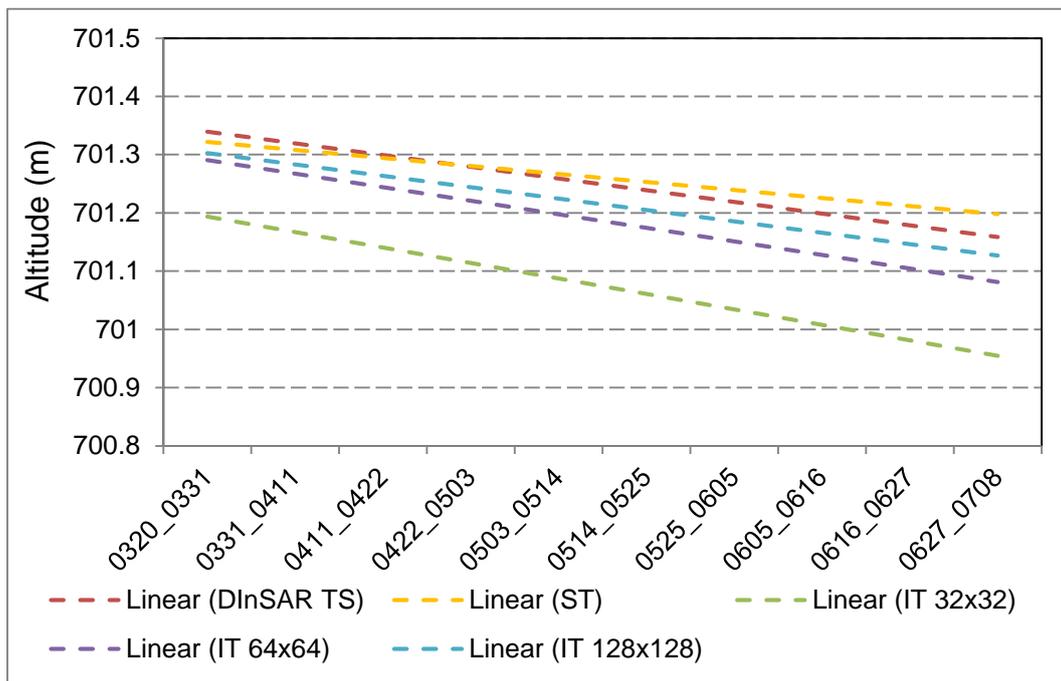


Figura 5.26 - Tendência linear da deformação temporal do ponto 118 para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados estatísticos da aplicação do teste de Wilcoxon para verificação da equivalência entre as deformações

amostrais obtidas a partir das técnicas DInSAR-TS e *Intensity Tracking* em comparação ao levantamento topográfico.

Tabela 5.4 - Resultados estatísticos amostrais referentes à aplicação do teste de hipóteses Wilcoxon entre os dados topográficos e as técnicas aplicadas.

Método	p-valor
DInSAR-TS	0,434757
<i>Intensity Tracking 32</i>	0,000293
<i>Intensity Tracking 64</i>	0,209676
<i>Intensity Tracking 128</i>	0,000293

A Tabela 5.5 apresenta os valores de RMSE determinados para as 17 amostras em relação à topografia.

Tabela 5.5 - Valores da Raiz do Erro Quadrático Médio das técnicas aplicadas em relação aos dados topográficos.

Técnica	RMSE (m)
DInSAR-TS	0,07719
<i>Intensity Tracking 32</i>	0,11750
<i>Intensity Tracking 64</i>	0,08754
<i>Intensity Tracking 128</i>	0,11423

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observa-se nas Figuras 5.20 e 5.21 que os resultados de deformação obtidos pela DInSAR *Time-series* aproximam-se dos dados *Speckle Tracking* disponíveis. É possível notar que os resultados obtidos pela *Intensity Tracking* foram bastante semelhantes para janelas de 64x64 e 128x128 pixels (com alta discrepância para os pares 0331_0411, 0411_0422 e 0616_0627) em comparação com resultados obtidos pela DInSAR-TS e dados ST e mais discrepantes para a janela de 32x32 pixels. Foi efetuado também um teste com janelas de 16x16 pixels que produziu resultados muito escassos, razão pelo qual foi rejeitado. É relevante destacar que para uma análise quantitativa os resultados não se mostraram similares entre *Intensity Tracking* e DInSAR-TS, o que pode justificar-se pelo fato de que suas abordagens diferem-se no método de determinação das deformações, em que DInSAR-TS utiliza interferometria enquanto *Intensity Tracking* baseia-se no deslocamento de espalhadores no sentido planimétrico.

A técnica *Intensity Tracking* apresentou um alto custo computacional, que é incrementado com o aumento do tamanho das janelas de busca na correlação cruzada. Com base nisso, observada a semelhança entre os resultados obtidos para janelas de busca de tamanho 128 e 64 pixels, optou-se pela janela 64x64 pixels para geração dos mapas de deformação (Figuras 5.16 e 5.17), observado que para janelas de 128x128 pixels, dependendo das configurações computacionais, o processo pode custar cerca de 3 vezes mais em relação às de 64x64. Ainda na Figura 5.20 observa-se que a técnica *Intensity Tracking* fornece resultados para a região do perfil AB que não foi passível de detecção pelas técnicas DInSAR *Time-series* e *Speckle Tracking*.

A partir da Figura 5.21, que apresenta os testes para definição do melhor intervalo entre o par de imagens, pode-se observar que no nível de discrepância de valores, os melhores resultados para *Intensity Tracking* foram obtidos para intervalos de 1 e 2 meses. No entanto, o padrão de comportamento entre DInSAR-TS/*Speckle Tracking* e *Intensity Tracking*

são mais semelhantes para 11 dias, apesar do *offset* existente entre elas. É interessante destacar que em (b) é possível detectar a colocação de material que causou deformação positiva, como se pode observar pelo levantamento topográfico apresentado na Figura 6.1, em que os pontos em verde identificam o levantamento topográfico realizado em 29 de março, em contrapartida aos pontos em vermelho, referentes ao levantamento de 20 de março; o mesmo ocorre para a Figura 5.21(c).

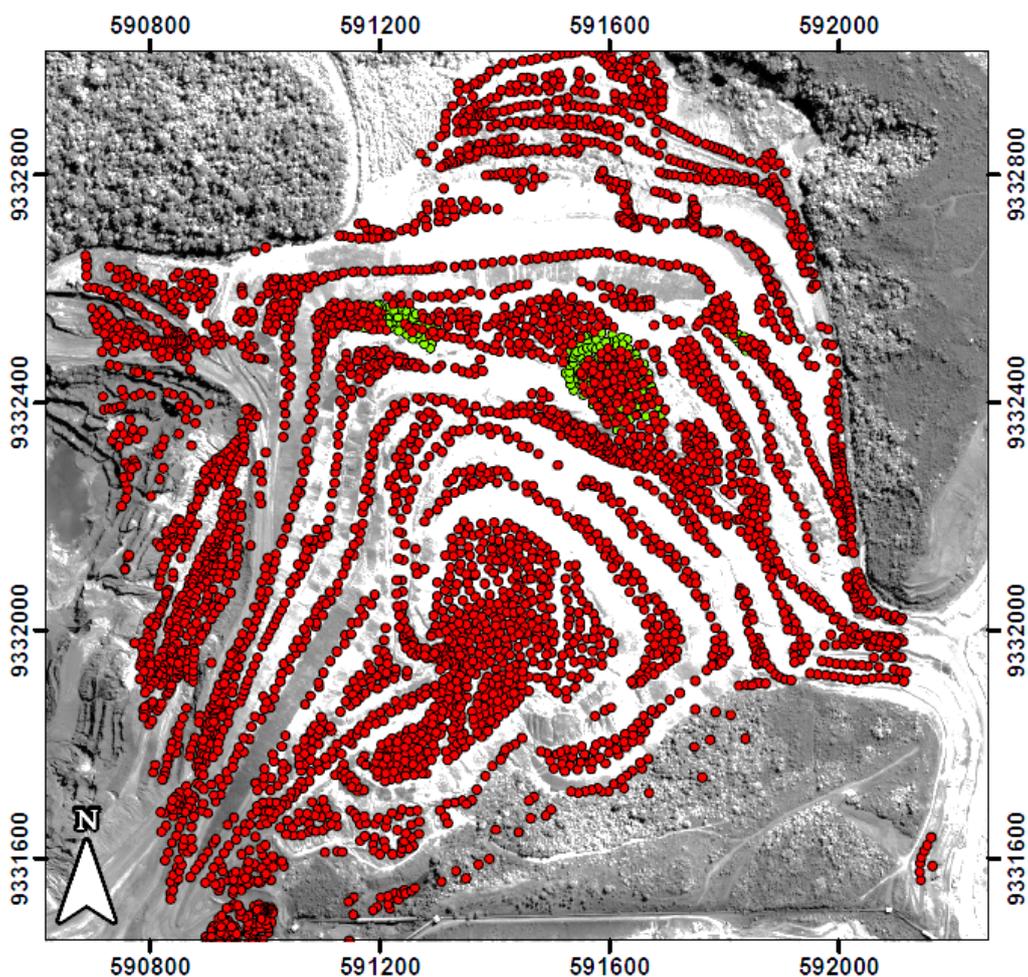


Figura 6.1 - Levantamentos topográficos em 20/03/2012 (vermelho) e 29/03/2012 (verde).

Para três meses (Figura 5.21 (d)) a discrepância entre os resultados foi relativamente alta, visto que houve grande movimentação antrópica neste intervalo, alterando as feições superficiais e comprometendo a qualidade dos resultados *Intensity Tracking*.

Com o objetivo de monitorar o comportamento da técnica no ambiente de trabalho e obter resultados passíveis de comparação com as demais técnicas, optou-se por aplicar a *Intensity Tracking* em pares com intervalos de 11 dias.

Observando-se as Figuras 5.23 e 5.25, relacionadas à variação temporal das altitudes dos pontos 54 e 118, respectivamente, é possível notar que melhores resultados foram obtidos para janela de busca de 64x64 e 128x128 pixels na *Intensity Tracking*. Pontua-se que a tendência linear de deformação tem comportamento aproximado ao da DInSAR-TS e ST, principalmente no ponto 54 (Figura 5.26); no entanto, janela de busca de 32 pixels superestima a deformação, e difere com destaque em relação às demais, como observa-se principalmente no ponto 118 (Figuras 5.25 e 5.26), justificada pela alta influência de ruídos nesta dimensão de janela. Por esta razão, associada à questão do custo computacional, optou-se por janela de busca na correlação cruzada de 64x64 pixels.

Os resultados discrepantes nas extremidades dos perfis apresentados nas Figuras 5.23 e 5.25 podem ser justificados pelos valores extremos de intensidade máxima nas imagens referentes a estes pares (Figura 6.2).

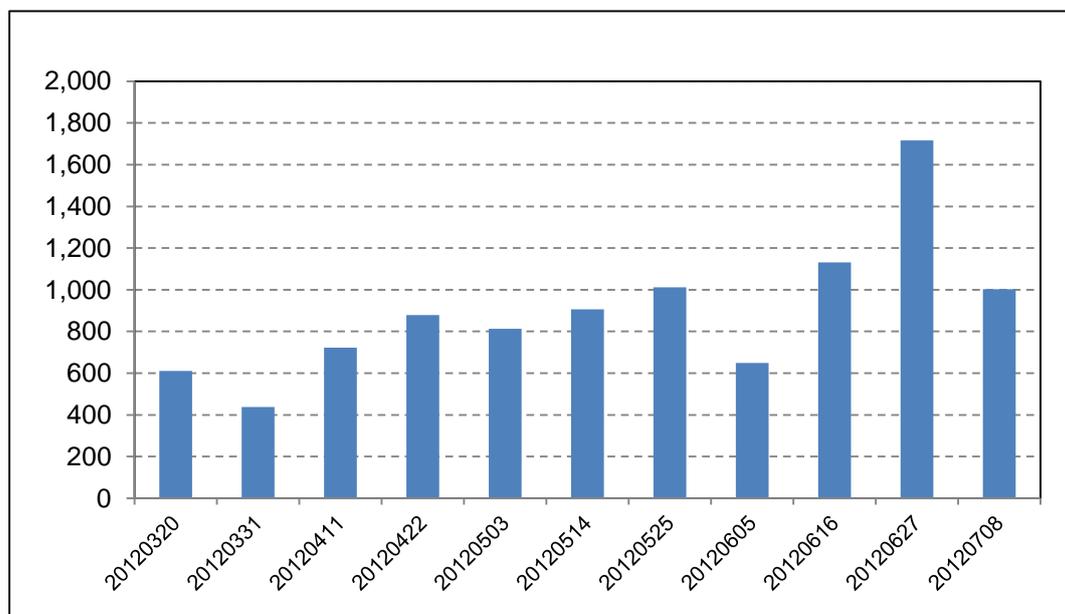


Figura 6.2 - Valores de intensidade máxima ($\times 10^6$) para as imagens de 20 de março a 8 de julho de 2012.

É interessante notar que, ao analisar os valores de precipitação (Figura 5.3) não se obtém uma relação direta com o comportamento da técnica. No entanto, os valores de linha de base perpendicular (Figura 5.1) apresentam um comportamento semelhante ao dos valores de intensidade máxima da cena para as imagens em questão (com valores extremos para as imagens que apresentaram resultados discrepantes na técnica *Intensity Tracking*), podendo assim, também justificar esse padrão.

A análise da Tabela 5.1 e das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 levam à conclusão de que a coerência entre os pares de imagens é em grande parte mais afetada pelos índices de precipitação e principalmente pela linha de base temporal, que pelo comprimento da linha de base perpendicular, visto que menores linhas de base temporais e menores índices de precipitação encontram-se relacionados a maiores valores de coerência, enquanto linhas de base perpendiculares mais curtas não se relacionam necessariamente a coerências mais elevadas.

A partir da observação da Tabela 5.2 e da Figura 5.4 verifica-se que o par (ou pares) de imagens selecionado para aplicação da técnica *Intensity Tracking*, que apresentou coerência média mais elevada sobre as regiões das PDEs com ausência ou escassez de resultados DInSAR-TS, encontra-se entre os pares de que apresentaram maior coerência também para o refletor de canto, o que comprova a qualidade das imagens para a aplicação.

A técnica DInSAR-TS apresentou bons resultados inclusive para grande parte da área sem recobrimento pela abordagem IPTA (PARADELLA *et al.*, 2015a). Observa-se que os resultados do período seco possuem uma maior abrangência da área, enquanto o período chuvoso apresenta grandes regiões com ausência de resultados. Esta condição pode estar relacionada com a atuação da pluviosidade, que altera a constante dielétrica dos espalhadores, favorecendo a descorrelação, o que introduz erros no desdobramento de fase.

Observa-se na Tabela 5.3 que o período seco apresenta os maiores valores de deformação negativa, traduzida como afastamento do satélite ao longo da LoS, que pode ser indicativa de subsidência da superfície. Nota-se também que os valores de deformação para o período completo não equivalem à soma dos valores dos outros dois períodos, uma vez que a introdução das imagens referentes ao período chuvoso no processamento provoca a redução da qualidade dos interferogramas, causando maior ocorrência de regiões com erro no desdobramento de fase, que culmina na ausência de resultados, como se observa na Figura 5.13. É interessante destacar ainda que a deformação do ponto P1 para o período completo apresenta-se inferior à deformação referente à soma dos dois períodos isoladamente, ocorrência que possivelmente também tem sua fundamentação nos erros de desdobramento de fase introduzidos pelas imagens do período chuvoso.

Dessa forma, conclui-se a importância da realização do processamento para os períodos separadamente, com o objetivo de minimizar a ocorrência de regiões com ausência de informação.

A partir da análise da Tabela 5.4 é possível verificar que, estatisticamente, apenas as técnicas DInSAR-TS e *Intensity Tracking* com janela de 64x64 pixels mostraram-se adequadas quando os resultados amostrais são comparados aos dados topográficos, a um nível de 95%. Corroborando esta conclusão, os resultados apresentados na Tabela 5.5 indicam que entre as dimensões de janelas de busca aplicadas, as de 64 pixels apresentam o menor valor de erro amostral, sendo esta e a DInSAR-TS as técnicas que indicaram possuir melhor acurácia. Conforme resultados apresentados na Tabela 5.5, as amostras apresentaram para a técnica DInSAR-TS um RMSE aproximado de 7 cm, enquanto para a *Intensity Tracking* 64 o erro determinado foi de aproximadamente 8 cm, mostrando comportamento similar para estas amostras. É relevante observar que os dados topográficos de deformação considerados incorporam também a colocação de material estéril e compactação por tráfego de maquinário, e não apenas a subsidência. Seria mais adequada a utilização de dados topográficos referentes a uma região “abandonada”, em que não

houvesse atuação antrópica; no entanto, utilizou-se o conjunto de dados topográficos medidos onde houve alteração do terreno para permitir a comparação entre as técnicas aplicadas, observando que entre elas, a mais precisa é a DInSAR-TS.

O aspecto de figuras geométricas (janelamento) observado no mapa de deformação por esta técnica refere-se às janelas de busca na correlação cruzada. Entre as vantagens desta técnica pode-se citar como as mais relevantes o recobrimento abrangente da área de aplicação, mesmo com grandes movimentações e a geração de um mapa de deformação em azimuth, fornecendo indícios de deformação também nesta direção. Observa-se ainda, nas Figuras 5.18 e 5.19 que as deformações obtidas ao longo das imagens não apresentam um aspecto de continuidade ou suavidade, mas sim transições bruscas, que pode ser justificado pela dependência da técnica em relação às condições radiométricas da imagem.

É importante destacar que a abordagem *Intensity Tracking* foi inicialmente concebida no contexto de monitoramento de geleiras, cujo fluxo rápido e não uniforme favorece a descorrelação, inviabilizando a aplicação de técnicas interferométricas (STROZZI *et al.*, 2002). Neste cenário o deslocamento comumente é horizontal e de grandes proporções, onde as feições da superfície das geleiras permanecem inalteradas por longos períodos. Aliando esses fatores a um grande período entre as aquisições de imagens compreende-se a adequabilidade desta técnica que busca por deslocamentos locais em um par de imagens precisamente corregistradas.

O ambiente da mineração, em especial em Pilhas de Disposição de Estéril, apresenta algumas divergências quanto a estas circunstâncias, visto que deformações ocorrem na maior parte das vezes na direção vertical, e de forma bastante lenta e gradual, além de contar com sucessivas operações antrópicas como novos aportes de material estéril, novos taludes de aterro, retaludamentos gerais, abertura de vias de acesso, etc., o que favorece a descorrelação, tendo em vista a alteração

das feições na superfície. Isto faz com que a aplicação técnica seja bastante limitada. Ainda que se possa avaliar a componente horizontal das deformações verticais a partir da visada inclinada do sensor, quando esta possui magnitude reduzida, sua componente fica aquém do nível de precisão da técnica.

De modo geral, no monitoramento de PDEs, a técnica DInSAR-TS apresenta um recobrimento razoavelmente abrangente, com área semelhante ao *Speckle Tracking*, porém, com melhor precisão. Para regiões com ausência de resultados DInSAR-TS e mesmo ST, a *Intensity Tracking* ofereceu cobertura com resultados, ainda que apresentando menor acurácia, estatisticamente adequados à aplicação, proporcionando a percepção da tendência do comportamento de deformação da superfície.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A combinação das técnicas DInSAR-TS e *Intensity Tracking* permitiu obter informações de deformação superficial em LoS das PDEs, mesmo em situações de alta taxa de mudança, permitindo assim o recobrimento de praticamente toda a área de interesse. Por sua vez, a técnica DInSAR-TS forneceu resultados mais precisos das deformações, mas a *Intensity Tracking* possibilitou inferir valores de deslocamento em duas direções (range e azimuth), com maior recobrimento, provendo tendências de deformação que podem ser utilizadas para direcionamento de ações e verificações/mitigações em locais das PDEs, cujo comportamento não foi passível de detecção pelas demais metodologias. Enfatiza-se que a técnica DInSAR-TS proveu melhores resultados, enquanto a técnica *Intensity Tracking* (que condiciona-se à resolução espacial do sensor) não se mostrou eficaz no monitoramento quantitativo de deformações de PDEs no ambiente de mineração estudado, podendo ser utilizada para regiões onde não há informações da técnica DInSAR-TS, para verificar a tendência de deslocamento superficial, quando os dados assim o permitirem.

Os mapas de deformação DInSAR-TS mostraram que a PDE NWI foi a que obteve maior deformação máxima acumulada, com -71 cm para o período seco e -17 cm para o chuvoso, enquanto a PDE W apresentou valores -53 cm e -29 cm e a PDE SIV -37 cm -18 cm, para os períodos sem e com chuvas, respectivamente, omitindo-se os locais cuja detecção não foi passível.

Os resultados apontam que praticamente toda a infraestrutura (esteiras, edificações) permaneceu estável durante o período analisado (20 de março de 2012 a 20 de abril de 2013). As deformações observadas sobre as PDEs podem ser associadas a recalques, comportamento esperado para essas estruturas. Não houve relatos da mineradora Vale S.A. de ruptura nessas estruturas no período estudado.

Assim, apesar das limitações das técnicas aplicadas, a DInSAR TS possibilitou obtenção de medidas de deformação nas PDEs, onde a técnica de espalhadores persistentes (PSI) utilizada por Paradella *et al.* (2015a) não foi bem sucedida. A técnica *Intensity Tracking* permitiu obter medidas de tendência de deformações onde o DINSAR-TS não proporcionou resultados nas PDEs, se mostrando interessante para o mapeamento em situações de intensas alterações antrópicas na superfície. A utilização das imagens de coerência foi fundamental para selecionar melhores pares de imagens para aplicação dessas técnicas.

A comparação de resultados obtidos pela técnica DInSAR-TS e *Intensity Tracking* com os provenientes do *Speckle Tracking* fornecidos pela TRE, juntamente com a análise estatística em relação aos dados topográficos cedidos pela Vale S.A, mostraram-se adequados e atuaram como um bom indicativo do comportamento superficial da área de estudo nas direções de LoS e azimute.

É relevante pontuar que a técnica *Intensity Tracking* é fortemente influenciada pela radiometria das imagens, sendo seus resultados sujeitos à eventual presença de ruídos na cena, enquanto DInSAR-TS e *Speckle Tracking* utilizam a contribuição da informação de fase interferométrica, sendo este o fator que afeta diretamente os resultados obtidos pelas três técnicas. Salieta-se ainda a alta influência da dinâmica antrópica intensa na área de estudo na aplicação da *Intensity Tracking*, fator que pode afetar em grandes proporções os resultados.

Com relação a parâmetros, as janelas de busca de correlação de 64x64 e 128x128 pixels apresentaram grande semelhança entre si. No entanto, apesar do alto custo computacional requerido pela janela de busca de 128 pixels, seus resultados não apresentaram incremento significativo na acurácia, conforme Tabela 5.5. Intervalos de 11 dias apresentaram bons resultados satisfatórios, o que favorece a aplicação mesmo em curtos períodos de tempo. No entanto, os melhores resultados *Intensity Tracking* apresentaram-se para um intervalo de aproximadamente 30 dias, sendo recomendado, assim, para situações em que a aplicação permitir este

intervalo entre as aquisições. Isso permite concluir que esta técnica apresenta baixa sensibilidade a alterações sutis na paisagem, e maior sensibilidade a grandes mudanças. É interessante, dessa forma, ajustar os parâmetros de processamento de forma que os ruídos na cena não influenciem significativamente nos resultados, tampouco a dinâmica da região possibilite grande ocorrência de descorrelação, fatores que variam, dependendo da área de estudo.

Quando comparadas às medidas topográficas de campo, as técnicas aplicadas mostraram adequabilidade e potencial na estimativa e monitoramento de deformações superficiais de Pilhas de Disposição de Estéril. A DInSAR-TS proporcionou medidas quantitativas com precisão considerável (erro amostral de aproximadamente 8 cm) e a *Intensity Tracking* forneceu resultados qualitativos, apresentando a tendência acerca do comportamento superficial abrangendo maiores áreas, até mesmo em regiões em que as demais técnicas citadas neste trabalho não foram capazes de detectar.

De modo a complementar a abrangência das técnicas de Sensoriamento Remoto aplicadas, já caracterizadas por uma visão sinóptica, recomenda-se, em trabalhos futuros, o uso de visadas complementares (descendente e ascendente) a fim de proporcionar a extração dos componentes vertical e horizontal da deformação. Sugere-se também a utilização de imagens adquiridas na banda L, uma vez que a banda X apresenta-se bastante sensível ao comportamento da vegetação na área, o que interfere nos resultados. Por fim, como alternativa à redução de custos, apresenta-se a recomendação de realizar testes com diferentes fontes de MDE como, por exemplo, *Worldview*, LiDAR, etc., com o intuito de observar os efeitos que podem incorrer sobre os resultados das técnicas aplicadas neste trabalho.

O *software* GAMMA Remote Sensing oferece opções de rotina para aplicação da *Intensity Tracking* sobre imagens SLC. Sugere-se também esta opção para futuros trabalhos.

Recomenda-se a aplicação de outras imagens SAR (como RADARSAT, por exemplo) com diferentes amostragens temporais e comprimentos de onda para verificar a influência nos resultados.

Por fim, sugere-se ainda a realização de um teste para verificar a eficácia da *Intensity Tracking* entre pares de imagens com diferentes intervalos de aquisição, deslocando-se propositalmente uma da outra em *range* e azimute e variando-se as dimensões das janelas de busca de correlação com o intuito de observar o comportamento do algoritmo em uma região estável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, Y.; HOWAT, I. M. Efficient, automated glacier surface velocity measurements from repeat images using multi-image/multi-chip (MIMC) feature tracking. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 8, p. 2838 - 2846. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2114891.
- ALVES, A. R. C. **Disposição compartilhada de rejeito e estéril gerados no processo de extração de minério de ferro**. 2009. 183 p. Dissertação (Mestrado em geotecnia)- -. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2009.
- AÑAZCO, J. R.; FRANÇA, G. B. Modelagem de estruturas convergentes do campo superficial de correntes na bacia de campos (RJ): por Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 21 no. 2, 2004.
- ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Dissertação. 2008. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.
- ARAGÃO, G. A. S.; OLIVEIRA FILHO, W. L. Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 64 no. 2, p. 193-198, Ouro Preto, MG, 2011.
- ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Serra dos Carajás. **Folha SB-22-Z-A, Estado do Pará**. Texto explicativo: 1-164. DNPM/CPRM, Brasília, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13029**: elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Rio de Janeiro, 2006.
- BAMLER, R. **Radar interferometry for surface deformation assessment**. **Summerschool Alpbach**. 2006. (Alpbach Summer School 2006)

- 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.
- BINS, L. S. **Estimação de fase absoluta e de linha de base em radar interferométrico de abertura sintética com múltiplas antenas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2014.
- BORROR, C. **Inferência estatística para duas amostras**. Notas de aula, 2011.
- CALDWELL, J. A.; MOSS, A. S. E.; KIRSTEN, S. R.; VANDRE, B. C. The simplified analysis of mine waste embankments. In: AIME CONFERENCE, PROC. DESIGN OF NON IMPOUNDING MINE WASTE DUMPS, 1981, Denver, Colorado. **Proceedings...** Denver, 1981.
- CASU, F.; MANCONI, A.; PEPE, A.; LANARI, R. Deformation time-series generation in areas characterized by large displacement dynamics: the SAR amplitude pixel-offset SBAS technique. **IEEE T. Geosci. Remote**, v. 49, n. 7, p. 2752–2763, 2011.
- CHILDS, C. **Interpolating surfaces in arcgis spatial analyst. ESRI education services**. 2004. Disponível em: <<https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>>. Acesso em 03 Fev 2015.
- COLESANTI, C.; LE MOUÉLIC, S.; 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, n. 1, 2005.
- CONSTANTINI, 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM).
Informe mineral, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM).
Normas reguladoras de mineração – NRM 19: Disposição de estéril
rejeitos e produtos. Disponível em: <[http://www.dnpm-
pe.gov.br/Legisla/nrm_19.htm](http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_19.htm)>. Acesso em 11 Ago. 2015.

EPA: U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **The design and
operation of waste rock piles at noncoal mines**. Waste Rock Pile
Report. 1995.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **InSAR principles**: guidelines for
SAR interferometry, processing and interpretation. Noordwijk, The
Netherlands: ESA Publications ESTEC (TM-19), 40p., 2007

FANG, L.; STILLA, U. Masked correlation for improvement of 2D glacier
motion estimation based on Terrasar-x imagery. **ISPRS Ann.
Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, v. n.7, p. 9-13, 2014.

FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F.;
RUCCI, A. A new algorithm for processing interferometric data-stack:
SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**,
v. 49, n. 9, p. 3460-3470, 2011.

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.

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.; PRATTI, C.; ROCCA, F. Multibaseline InSAR DEM
reconstruction: the wavelet approach. **IEEE Transactions on
Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 2, p. 705-715, 1999.

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra:** Floresta Nacional do Tapajós. 2002. 137 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensores Remotos e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/04.10.08.52>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

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. 9183-9191, 1989.

GAMA, F. F. **Estudo da interferometria e polarimetria SAR em povoamentos florestais de eucalyptus SP.** 2007. 242 p. (INPE-14778-TDI/1231). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.04.12.36>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

GAMA, F. F.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; SANTOS, A. R. Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 8405-8412. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em: <http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GJB5>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; ASSIS, L. M. Proposta de avaliação de técnicas de interferometria diferencial avançada (A-DinSAR) de dados SAR orbitais dos satélites TerraSAR-X e COSMO-SkyMed no monitoramento de instabilidade de minas de ferro a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero – MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015a. p. 1539-1546.

Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em:<<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM48UL>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

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 mine in the Brazilian Amazona region using SBAS interferometric technique and TerraSAR-X data. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2015, Milão. Proceedings... Milão: IEEE International, 2015b. p. 282-285b.

GAMMA Remote Sensing. **GAMMA software documentation – user’s guide**. Version 20130717. 2013.

GAO, J., LYTHER, M. B. The maximum cross-correlation approach to detecting translational motions from sequential remote-sensing images. **Computers & Geosciences**, v.22, n. 5, p. 525-534, 1996.

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,

GOMES, L. L. **Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela equação universal de perda do solo (EUPS) – pilha de estéril sul – Carajás/PA**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 172p., 2012.

HARANT, O.; BOMBRUN, L.; VASILE, G.; FERRO-FAMIL, L. GAY, M. Displacement estimation by maximum likelihood texture tracking. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, v. 5 no.3, p.567-576, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Plano de manejo para uso múltiplo da Floresta Nacional de Carajás**. Brasília, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. Pará: Parauapebas. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=150553>>. Acesso em 15 mar 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Brasília, 2015a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral do estado do Pará**. Informações e análises da economia mineral brasileira. 7. ed. Brasília, 2015b.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA . Departamento de Informática e Estatística (UFSC.INE). **Teste de Wilcoxon**. Florianópolis, 2012. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~verav/Testes_de_Hipoteses/Teste_ao_parametrico_Wilcoxon.pdf>. Acesso em 6 Fev. 2016.

KUMAR, J. **Radar and synthetic aperture radar system**. Notas de aula, 2011.

LANARI, R.; MORA, O.; MANUNTA, M.; MALLORQUÍ, J. J.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 7, 2004.

LIU, H.; ZAO, Z.; JESEK, K. C. Synergistic fusion of interferometric and speckle-tracking methods for deriving surface velocity from interferometric SAR data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 1, 2007.

LOZANO, F. A. R. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUNDGREN, P.; USAI, S.; SANSOTI, E.; LANARI, R.; TESAURO, M.; FORNARO, G.; BERARDINO, P. Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. B9, p. 355-366, 2001.

MACEDO, K. A. C.; WIMMER, C.; BARRETO, T. L. M.; LÜBECK D.; MOREIRA, J. R.; RABACO, L. M. L.; OLIVEIRA, W. J. Operacionalização da interferometria diferencial (D-InSAR) para o sistema OrbiSAR – Estudo de caso realização na região de São Sebastião, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 8207-8214. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39UGNS8>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

MADSEN, S.N.; ZEBKER, H.A. Imaging radar interferometry. In: HENDERSON, F.M., LEWIS, A.J. (eds). **Principles & applications of imaging radar: manual of remote sensing**. 3. ed.. Danvers, MA, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1998. v. 2, p. 359–380.

MORRO DO PILAR MINERAIS S.A. Estudo de impacto ambiental. **Geonature**, v. 2. Belo Horizonte, 2012.

MUNIZ, D. H. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1/2, p. 83-100, 2006.

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>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

MURA, J. C. Geocodificação automática de Imagens SAR interferométricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. (SBSR)., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1321-1328. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1. (INPE-8254-PRE/4044). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2001/09.20.17.51>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

MURA, J. C. **Processamento de imagens SAR**: interferometria diferencial SAR – DInSAR/Interferometria Diferencial SAR de Alvos Persistentes – A-DInSAR.. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013. Notas de aula.

MURA, J. C. **Processamento de imagens SAR**: interferometria de imagens SAR. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Notas de aula.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G. Monitoring of Surface Deformation in Open Pit Mine Using DInSAR Time-Series: a case study in the N5W Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: SPIE REMOTE SENSING 2014, 2014, Amsterdã Cardiff. **Proceedings...** 2015. v. 9243, p. 1-18. DVD.

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 (N5W – Carajás) utilizando série temporal de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR) baseado em dados do satélite TerraSAR-X. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos, 2015.

NIEVINSKI, F. G. **Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR)**. Trabalho de conclusão apresentado como requisito parcial para

a obtenção do título de Engenheiro Cartógrafo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

OLIVEIRA, J. K. M. **Caracterização estrutural da borda sudeste do sistema transcorrente Carajás com ênfase nas rochas do terreno granítico-gnáissico**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

ORMAN, M.; PEEVERS, R.; SAMPLE, K. Waste piles and dumps. In: Peter, D. (ed.). **SME mining engineering handbook**. 3. ed. Society for Mining Metallurgy & Exploration, 2011. p. 667-680.

PARADELLA, W. R.; CHENG, P. Using Geoeye-1 stereo data in mining application: automatic DEM generation. **Geoinformatics**, v. 16, p.10-12, 2013.

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

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, 2015b. Relatório Científico Final, Processo FAPESP 2010/51267-9.

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

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco**. 2010. 137p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010.

PIMENTEL, T. Prefeito de Mariana diz que Prefeito de Mariana diz que prejuízo com barragens é de R\$ 100 milhões. **G1. Globo.com**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/prefeito-de-mariana-diz-que-prejuizo-com-barragens-e-de-r-100-milhoes.html>>. Acesso em 13 Nov. 2015.

PINTO, C. A.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. Results of the application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in the Azul open pit manganese mine (Carajás Province, Amazon region) using TerraSAR-X data. SPIE REMOTE SENSING 2014., 2014, Amsterdã Cardiff, UK. **Proceedings...** 2014. v. 2014, p. 1-18. DVD. ISBN 0277-786X. doi: <10.1117/12.2067233>. SPIE v. 9245, 2014.

PINHEIRO, R. V. L. **Reactivation history of the Carajás and cinzento strike slip systems, Amazon, Brazil**. 1997. 408p. Ph. D. Dissertation - University of Durham, UK, 1997.

RAMOS, F. L. G. **Desenvolvimento de técnicas para processamento de dados orbitais de interferometria SAR em regiões equatoriais úmidas**: estudo de caso em Manaus, Amazonas, Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

RASPINI, F.; MORETTI, S.; FUMAGALLI, A.; RUCCI, A.; NOVALI, F.; FERRETI, A.; PRATI, C.; CASAGLI, N. The COSMO-SkyMed constellation monitors the Costa Concordia wreck. **Remote Sensing**, v.6, n. 5, 2014.

REBELO, C. R. **Aplicação do InSAR na geração de modelos digitais do terreno**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

ROTT, H.; STUEFER, M.; SIEGEL, A. Mass fluxes and dynamics of Moreno glacier, southern Patagonia icefield. **Geophysical Research Letter**, v. 25, n. 9, p. 1407-1410, 1998.

SANSOSTI, E.; BERARDINO, P.; BONANO, M.; CALÒ, F.; CASTALDO, R.; CASU, F.; MANUNTA, M.; MANZO, M.; PEPE, A.; SOLARO, G.; TIZZANI, P.; ZENI, G.; LANARI, R. How second generation SAR systems are impacting the analysis of ground deformation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 28, p. 1-11, 2014.

SANTOS, E. G.; OLIVEIRA NET, R.; ABICHEQUER, L. A.; SOUZA, L. E.; MARQUES, R.; GONÇALVES, I. G. Recuperação ambiental na disposição de estéril em mineração de calcário. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, p. 14-32, 2015.

SORGATO, V. A. **Reconhecimento de mensagens em uma rede PLC banda estreita**. Relatório da disciplina INE5327 – Projeto em Ciência da Computação I, referente ao Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

STROZZI, T.; LUCKMAN, T. M.; WEGMÜLLER, U. WERNER, C. L. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, no. 11, 2002.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, n. 3, p. 174-182, 1999.

TEATINI, P.; GAMBOLATI, G.; CASTELLETTO, N.; FERRONATO, M.; JANNA, C.; CAIRO, E.; MARZORATI, D.; COLOMBO, D.; FERRETTI, A.; BAGLIANI, A.; BOTTAZZI, F.; ROCCA, F. Monitoring and modelling 3-D ground movements induced by seasonal gas storage in deep reservoirs. In: EISOLS 2010, Querétaro, Mexico. **Proceedings...** IAHS Publ, 2010.

TEIXEIRA, M. B. **Estudo numérico do comportamento mecânico de pilhas de estéril de mineração**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

TELE-RILEVAMENTO EUROPA (TER). **Rapid motion tracking**. Disponível em: <<http://treuropa.com/technique/rapid-motion-tracking>>. Acesso em 22 Jan. 2016.

ULABY, F. T. Radar signature of terrain: useful monitors of renewable resources. **Proceedings of IEEE**, v. 70, n. 12, p.1410-1428, 1982.

VALE. **A Vale no Pará**. Disponível em: <<http://mundo.intranetvale.com.br/PT/Unidade/Content/Brasil/PA>>. Acesso em 7 Nov. 2015.

VALE. **Projeto Ferro Carajás S11D**: um novo impulso ao desenvolvimento sustentável do Brasil. 2013. Disponível em: <www.vale.com/s11d> Acesso em 10 Out. 2015.

WEGMÜLLER U.; WERNER, C. L. SAR interferometric signatures of forest. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 5, p. 1153-1191, 1995.

WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. GAMMA SAR and interferometric processing software. In: ERS – ENVISAT SYMPOSIUM, 2000, Gothenburg Sweden. **Proceedings...** Gothenburg, Sweden, 2000.

WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Precision of local offsets between pairs of SAR SLCs and detected SAR images. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS, 2005. **Proceedings...** IEEE International, 2005. v. 7, p. 4803-4805.

YAN, S.; GUO, H.; LIU, G.; RUAN, Z. Mountain glacier displacement estimation using a DEM-assisted offset tracking method with

ALOS/PALSAR DATA. **Remote Sensing Letters**, v.4, n.5, p. 494-503, 2013.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, 1992.

ZHOU, C.; ZHOU, Y.; E, D.; WANG, Z; SUN, J. Estimation of ice flow velocity of calving glaciers using SAR interferometry and feature tracking. In: FRINGE 2011 WORKSHOP, 2011, Frascati, Itália. **Proceedings...** Frascati: ESA, 2011. (ESA SP-696, January 2012).

APÊNDICE A – ORGANIZAÇÃO CRONOLÓGICA DAS ETAPAS

ANO	2012																				2013																		
Evento \ DATA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0							
	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	9	9	9	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1	2	3	3	4	4						
	2	3	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	3	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	2	1	2	0	1	2	0	2						
	0	1	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	0	0	1	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	0	1	2	2	8	9	9	0						
Imagens TSX																																							
DInSAR-TS Completo																																							
DInSAR-TS Seco																																							
DInSAR-TS Chuvoso																																							
ST																																							
IT 32																																							
IT 64																																							
IT 128																																							
Valid. MDE Topo																0	9	1	4																				
Topo Estatística																0	8	3	1																				
Validação Estatística																1	4																						

APÊNDICE B – GAMMA Remote Sensing

GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG (GAMMA) foi fundada em janeiro de 1995 e localizada em Berna, na Suíça. O *software* GAMMA proporciona ferramentas para suportar todo o processamento de dados brutos SAR a produtos de alto nível, tais como modelos digitais de elevação, deformação, e mapas de uso do solo. É agrupado em quatro pacotes de processamento de imagens SAR:

- *Modular SAR Processor* (MSP) – geração de produtos SLC a partir de imagens SAR brutas;
- *Interferometric SAR Processor* (ISP) – correção e reamostragem de imagens SLC, estimação da linha de base, geração de interferogramas e mapas de correlação e conversão de dados de *slant-range* para *ground-range*;
- *Differential Interferometry and Geocoding* (DIFF&GEO) – geocodificação, correção e simulação de dados e imagens SAR;
- *Land Application Tools* (LAT): Classificação de imagens, análise multitemporal, cálculo de estatísticas e geração de mosaicos;
- *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) – exploração das características espaciais e temporais de assinaturas interferométricas coletadas a partir de alvos pontuais para mapeamento preciso de deformações superficiais históricas, elevações de terreno e atrasos de trajetória relativos à atmosfera;
- *Display Tools and Utilities* (DISP) – exibição de imagens SAR e conjuntos de imagens interferométricas, geração de imagens *.bmp e *.sun e utilidades de cópia;
- *Motion Compensation* (MOCOM) – execução do processamento de dados de Unidade de Navegação Inercial e compensação de movimento.

O *software* é desenvolvido em ANSI-C e tem sido instalado em estações UNIX e plataformas PC com sistemas operacionais LINUX ou NT. A documentação é fornecida em linguagem HTML (WERNER *et al.*, 2000).