



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.16.18.37-TDI

**INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS A-DINSAR NA
DETECÇÃO DE MOVIMENTOS SUPERFICIAIS EM
MINAS A CÉU ABERTO NA REGIÃO AMAZÔNICA
COM DADOS TERRASAR-X**

Guilherme Gregório Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Waldir Renato
Paradella, e José Claudio Mura,
aprovada em 16 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NH6978>>

INPE
São José dos Campos
2017

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

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 Duca 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, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.16.18.37-TDI

**INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS A-DINSAR NA
DETECÇÃO DE MOVIMENTOS SUPERFICIAIS EM
MINAS A CÉU ABERTO NA REGIÃO AMAZÔNICA
COM DADOS TERRASAR-X**

Guilherme Gregório Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Waldir Renato
Paradella, e José Claudio Mura,
aprovada em 16 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NH6978>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Guilherme Gregório.
Si38i Integração de técnicas A-DInSAR na detecção de movimentos superficiais em minas a céu aberto na região Amazônica com dados TerraSAR-X / Guilherme Gregório Silva. – São José dos Campos : INPE, 2017.
xxvi + 88 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.16.18.37-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Waldir Renato Paradella, e José Claudio Mura.

1. Interferometria. 2. SAR. 3. DInSAR. 4. PSI. 5. TerraSAR-X.
I. Título.

CDU 528.8.044.2(811.3)



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

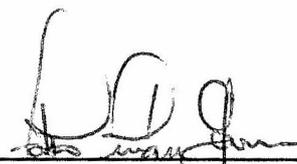
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Guilherme Gregório Silva*

**"INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS A-DINSAR NA DETECÇÃO DE MOVIMENTOS SUPERFICIAIS EM MINAS
A CÉU ABERTO NA REGIÃO AMAZÔNICA COM DADOS 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 / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Waldir Renato Paradella

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. José Claudio Mura



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



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, 16 de março de 2017

“Nosso grande medo não é o de que sejamos incapazes.

Nosso maior medo é que sejamos poderosos além da medida. É nossa luz, não nossa escuridão, que mais nos amedronta.

Nos perguntamos: "Quem sou eu para ser brilhante, atraente, talentoso e incrível?" Na verdade, quem é você para não ser tudo isso?...Bancar o pequeno não ajuda o mundo. Não há nada de brilhante em encolher-se para que as outras pessoas não se sintam inseguras em torno de você.

E à medida que deixamos nossa própria luz brilhar, inconscientemente damos às outras pessoas permissão para fazer o mesmo.”

Nelson Mandela

A minha família, em especial minha esposa Rose e minha pequena Beatriz, e meus pais, Edilson e Cristina, por todo o apoio até aqui.

AGRADECIMENTOS

De certa forma não há como descrever todos os fatores e pessoas que me trouxeram até o momento desta defesa, mas gostaria de deixar aqui meus sinceros agradecimentos a todos os que se sintam ou se sentiram envolvidos com toda a evolução até aqui, mesmo que seus nomes aqui não constem.

Agradecer a Deus também faz parte da oração, sem minhas sinceras conversas com Ele não poderia ter chegado até aqui, pela clareza em meus pensamentos, pela concordância em meus escritos e discursos, meu muito obrigado.

Cronologicamente, os primeiros agradecimentos ao Prof. Dr. Mario Valério e a Prof.^a Dr.^a Maria Regina (UNIVAP) pelo reconhecimento de meus conhecimentos, necessários para me trazer ao INPE.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade única de realizar o sonho deste trabalho de Mestrado, oferecendo toda infraestrutura necessária, além de todo material humano ilustre do Instituto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro empregado durante o período da 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 n.º 2010/51267-9).

Ao amigo, mentor e meu orientador, Prof. Dr. Waldir Renato Paradella, que me proporcionou o grande desenvolvimento pessoal e profissional no decorrer dos meus seis anos no Instituto, pelas amplas conversas e instruções, pela construção do conhecimento que hoje vejo ser fundamental para mim e minha família.

Ao também amigo, mentor e orientador, Prof. Dr. José Cláudio Mura, meus sinceros agradecimentos, em especial por assumir prontamente a minha orientação oficialmente após os acasos do destino. Muito obrigado por poder compartilhar comigo todos os conhecimentos técnicos adquiridos com muito esforço e suor de sua parte.

Aos amigos Prof. Dr. Fábio Gama, Prof. Dr. Athos Ribeiro, Prof. Dr. Lênio Soares e o Prof. Dr. João Roberto, pelo apoio durante todo o meu processo de formação, pelas conversas e suporte para a conclusão da pesquisa aqui contida.

Aos colegas extraterrestres do SAR, Filipe, Heloísa, Carol, Évelyn, Natalia e Priscila, pela amizade, papos e a di visão do conhecimento. Sem vocês não poderia ter tido os mesmos resultados.

A toda turma SERE 2015, pelos dias incansáveis de estudo e conversas.

A minha família: Rose, Bia, Pai, Mãe, Avôs (Joãozinho e Zé), Avós (Benvinda e Neusa), Henrique, Yago, Luzia minha sogra e Joaquim meu sogro. Vocês são minha base e meu porto seguro. Tudo isso só foi possível graças a vocês.

Em especial a minha esposa Rose, sem sua compreensão e noites mal dormidas nada disso seria possível. Muito obrigado por estar nos meus choros e vitórias e não me deixar desistir precocemente.

Sei que minha pequena Beatriz ainda não pode entender a importância dela neste trabalho, mas sei que futuramente ela lerá este agradecimento e peço que tenha orgulho do feito de seu pai, pois tudo aqui foi por ela e sua mãe.

RESUMO

No Brasil a produção mineral rendeu cerca de U S\$ 40 bilhões em 2014. Instabilidades nas áreas de mineração são rotineiras, podendo causar colapsos nas áreas em operação de minas a céu aberto. A detecção prévia de movimentações superficiais serve diretamente ao planejamento e prevenção de riscos nessas localidades. A evolução das técnicas de interferometria diferencial concomitantes ao crescimento da gama de sensores orbitais SAR disponíveis, possibilitaram aplicações interferométricas das mais distintas possíveis pelo mundo todo, contribuindo no desenvolvimento econômico e social de diversas localidades. A fase interferométrica é a essência da técnica InSAR, tendo na diferença de fase a medida fundamental desta. Para a determinação da fase relacionada com a deformação de cada pixel, devem ser removidos vários componentes da fase total, tais como a componente de fase topográfica, a contribuição de fase relacionada com o atraso na atmosfera e a contribuição de fase relacionada com o ruído do sistema. A principal limitação presente da técnica de processamento interferométrico diferencial de espalhadores persistentes (PSI), utilizando a metodologia IPTA (software Gamma RS), é a remoção da fase relacionada à atmosfera, pois a medida que se afasta do ponto de referência esta componente de fase tende a aumentar, tornando mais difícil o processo de desdobramento de fase. Neste trabalho, realizou-se uma combinação de duas técnicas de processamento para minimizar o problema mencionado anteriormente, ou seja, primeiro realizar um processamento inicial, em uma resolução espacial mais degradada, com a técnica DInSAR Time-Series (DTS). Os resultados desta primeira técnica, referentes ao deslocamento superficial e ao erro do modelo de elevação, são utilizados como informação prévia para a execução da técnica PSI, que trabalha na resolução plena das imagens SAR. Com a combinação destas técnicas, foi possível mapear todo o Complexo Minerador da Serra Norte - Carajás/PA, com uma extensão que cobre as minas N4 e N5 integralmente, utilizando imagens TerraSAR-X. Os resultados obtidos após os testes mostraram boa concordância da técnica PSI com as informações de medidas de campo na região, mas com maior cobertura espacial na área teste para detecção de deformações. Com isso, foi possível gerar um mapa de deformação dos pontos de retorno persistente (PS) de toda a área coberta pela técnica DTS, com precisão milimétrica. Os resultados foram validados através do uso de medidas topográficas de campo, utilizando estação total/prismas, mostrando uma boa concordância entre eles. Também concluiu-se que os resultados remotos apresentaram boa concordância com as informações disponíveis relacionadas às classes geomecânicas. Verificou-se que os resultados obtidos mostraram que a combinação das técnicas aplicadas no estudo, apresentou melhores resultados quando comparadas as técnicas aplicadas independentemente.

Palavras-chave: Interferometria. SAR. DInSAR. PSI. TerraSAR-X. IPTA.

INTEGRATION OF A-DINSAR TECHNIQUES IN THE DETECTION OF SURFACE MOVEMENTS IN OPEN PIT MINES IN THE AMAZON REGION WITH TERRASAR-X DATA

ABSTRACT

In Brazil, mineral production yielded about US\$ 40 billion in 2014. Instability in the mining areas is routine and may cause collapses in the areas in open pit mining. The prior detection of surface movements directly serves the planning and prevention of risks in these locations. The evolution of the differential interferometry techniques and the growth of the orbital SAR sensors, allowed interferometric applications of the most different possible around the world. The interferometric phase is the essence of the InSAR technique, where phase difference is the fundamental measurement of this. In order to determine the phase related to the deformation of each pixel, several components of the total phase, such as the topographic phase, the phase contribution related to the delay in the atmosphere and the noise related phase contribution of the system. The main present limitation of the technique of differential interferometric processing of Persistent Scatterers (PS), using the IPTA technique, is the removal of the phase related to the atmosphere, as the distance from the reference point, this component of phase tends to increase, making the phase unwrapping process more difficult. In this work, a combination of two processing techniques was performed to minimize the previously mentioned problem, i.e. first performing an initial processing, in a more degraded spatial resolution, with the DInSAR Time-Series (DTS) technique. The results of this first technique, referring to the superficial displacement and the error of the elevation model, were used as previous information for the execution of the PSI technique, which works on the full resolution of SAR images. With this combination of techniques, it was possible to map the entire Serra Norte - Carajás / PA Mining Complex, with an extension that covers the N4 and N5 mines integrally, using TerraSAR-X images. The results obtained after the tests showed good agreement of the PSI technique with the information of field measurements in the region, but with greater space coverage in the test area in the detection of deformations. With this, it was possible to generate a map of deformation of the persistent scatterer points (PS) of the entire area covered by the DTS technique, with millimetric precision.. The results were validated through the use of topographic field measurements, using total station and prisms, showing a good agreement between the two methodology. It was also observed that the remote results showed good agreement with the available information related to the geomechanical classes. Concluding, the results obtained showed that the combination of techniques presented better results when compared to the techniques applied independently.

Keywords: Interferometry. SAR. DInSAR. PSI. TerraSAR-X. IPTA.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1. Geometria de um sistema SAR.....	9
Figura 2.2. Interferometria de passagem única e de duas passagens.....	11
Figura 2.3. Classificação da tecnologia InSAR na detecção de deformações.	12
Figura 2.4. Exemplo de configuração de interferogramas diferenciais para 33 imagens do TerraSAR-X.	14
Figura 2.5. Ilustração do comportamento da fase para pixel com espalhadores distribuídos (a) e para pixel com espalhadores coerentes (persistentes) (b).	16
Figura 2.6. (a) Imagem StripMap do TSX-1 e (b) candidatos a PS representados pelos pontos na cor amarela da mesma área.	17
Figura 2.7. Exemplo de configuração de 3 linhas de base em relação a imagem mestre.	18
Figura 2.8. Exemplo de configuração de linhas de bases em relação a imagem mestre.	19
Figura 2.9. Ilustração da modelagem de processamento da metodologia IPTA.	20
Figura 3.10. Localização e acessos para a FLONA de Carajás.....	22
Figura 3.11. (A) Vista aérea da Rodovia de acesso ao Núcleo Urbano e (B) Trecho da Rodovia Raymundo Mascarenhas.	23
Figura 3.12. Complexo Minerador de Carajás e a subdivisão das minas.....	25
Figura 3.13. Índice pluviométrico para o Complexo Minerador de Carajás no período de estudo e as datas de imagens TSX-1 disponíveis.	27
Figura 3.14. Afloramento ferruginoso em Carajás.....	28
Figura 3.15. Mapa de solos da FLONA de Carajás.....	30
Figura 3.16. Hipsometria da FLONA Carajás.....	31
Figura 3.17. Hipsometria na área de estudo.	32
Figura 3.18. Clinografia na área de estudo.	34
Figura 3.19. Plataforma Sul-Americana e principais domínios geotectônicos...	35

Figura 3.20. Craton Amazônico e suas províncias minerais.	36
Figura 3.21. Mapa das formações geológicas da FLONA de Carajás.....	38
Figura 4.22. Fluxograma geral do trabalho.	41
Figura 4.23. Fluxograma de processamento das técnicas conjuntas DTS e PSI.	43
Figura 4.24. Limites de segurança para definição de estabilidade.....	45
Figura 4.25. Mapa de Classes Geomecânicas para o Complexo.....	48
Figura 5.26. Pares interferométricos selecionados com base na pilha de 33 imagens TSX-1.....	50
Figura 5.27. Mapas com a evolução dos deslocamentos superficiais com a técnica DInSAR-TS para o Complexo Minerador de Carajás.....	51
Figura 5.28. Mapa de deslocamento superficial acumulado oriundo da técnica DInSAR-TS para o Complexo Minerador de Carajás.	52
Figura 5.29. Pares interferométricos selecionados com base na imagem mestre (04 de outubro de 2012).	53
Figura 5.30. Mapa de deslocamentos superficiais expresso em velocidade média de deformação em LoS para o Complexo Minerador de Carajás.	55
Figura 5.31. Mapa de deslocamento superficial expresso em velocidade média em LoS para a Pilha de Estéril NWI.	57
Figura 5.32. Deslocamento em LoS do ponto I (Figura 5.29).	58
Figura 5.33. Mapa de deslocamento superficial expresso em velocidade média em LoS para as bancadas do setor SW da Mina N5W.	59
Figura 5.34. Deslocamento em LoS do ponto I (Figura 5.31).	59
Figura 5.35. Mapa do desvio padrão das taxas médias de deslocamento superficiais.	61
Figura 5.36. Prismas para validação, flanco Norte da Mina N4E, borda da PDE W.....	62
Figura 5.37. Gráfico dos prismas para validação, prismas P1, P2 e P3.....	63
Figura 5.38. Gráfico dos prismas para validação, prismas P4, P5 e P6.....	65
Figura 5.39. Evidência de trinca na rampa do talude da mina N5W.....	66

Figura 5.40. Evidência de trincas com orientação para o interior da mina N5W.	67
Figura 5.41. Evidência de trincas no talude da mina N5W (a) e na estrada acima do talude da mina N5W (b).	67
Figura 5.42. Gráfico do prisma ES01 para validação do talude de corte da mina N5W.	68
Figura 5.43. Gráfico do prisma ES02 para validação do talude de corte da mina N5W.	69
Figura 5.44. Gráfico do prisma ES03 para validação do talude de corte da mina N5W.	69
Figura 5.45. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N4W....	73
Figura 5.46. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N4E.	74
Figura 5.47. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N5W....	75
Figura 5.48. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N5E.	76
Figura 5.49. Análise dos resultados de classificação por deformações para a mina N4W.....	79
Figura 5.50. Acesso ao complexo minerário pela mina N5W.....	81

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1–Tipologias de cobertura encontradas na FLONA de Carajás.	28
Tabela 3.2–Tipos de solos na FLONA de Carajás.	29
Tabela 3.3– Faixas altimétricas na FLONA de Carajás.....	31
Tabela 3.4–Classificação por declividade na FLONA de Carajás.	33
Tabela 3.5–Geologia na FLONA de Carajás.....	37
Tabela 4.6–Classes Geomecânicas para os maciços da Vale, segundo RMR.46	
Tabela 4.7–Relação dos litotipos mapeados com à qualidade geomecânica no Complexo.	47
Tabela 5.8–Data das aquisições das imagens, linha de base perpendicular (m) e intervalo relativo de tempo para a imagem mestre (04/10/2012).	54
Tabela 5.10–Relação de PS por área das minas do Complexo.	72
Tabela 5.10 – Classificação por classes geomecânicas e deformações para as minas N4E, N4W, N5E e N5W.....	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A-DInSAR	<i>Advanced Differential Synthetic Aperture Radar</i>
CCRS	<i>Canada Centre for Remote Sensing</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais
CSA	<i>Canadian Space Agency</i>
DLR	<i>Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DInSAR	<i>Differential SAR Interferometry</i>
DInSAR TS	<i>Differential SAR Interferometry Time-Series</i>
DOCEGEO	Rio Doce Geologia e Mineração
EADS	<i>European Aeronautic Defence and Space</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	<i>Interferometric SAR</i>
IPM	Índice de Produção Mineral
IPTA	<i>Interferometric Point Target Analysis</i>
LoS	<i>Line of sight</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
PDE	Pilha de Disposição de Estéril
PMC	Província Mineral de Carajás
POLIMI	<i>Politecnico di Milano</i>
PS	<i>Persistent Scatterers</i>
PSI	<i>Persistent Scatterers Interferometry</i>
PSInSAR	<i>Permanent Scatterer Interferometry</i>
PSref	<i>Persistent Scatterers de referência</i>

RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RFM	<i>Rational Function Model</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RPCs	<i>Rational Polynomial Coefficients</i>
RSM	<i>Radar Specific Model</i>
RST-2	Satélite RADARSAT-2
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS	<i>Small Baseline Subsets</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLC	<i>Single Look Complex</i>
SSR	<i>Slope Stability Radar</i>
SLAR	<i>Side-looking Airborne Radar</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SVD	<i>Single Value Decomposition</i>
TRM	<i>Toutin's 3D Radargrammetric Model</i>
TSX-1	Satélite TerraSAR-X
UF	<i>Ultra-Fine</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</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
$\phi_{\epsilon_{topo}}$	Fase relativa ao erro de fase topográfica residual
t_1	Tempo
ϕ^T_{Ob}	Vetor de fase desdobrada observada
ϕ^T_{Disp}	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

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	4
1.1.1. Objetivo geral.....	4
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1. Mineração no país.....	6
2.1.1. Contextualização.....	6
2.1.2. Região amazônica.....	6
2.1.3. Segurança e planejamento minerário.....	7
2.1.4. Mineração a céu aberto.....	7
2.2. Caracterização das imagens SAR.....	8
2.2.1. Radar de Abertura Sintética (<i>Synthetic Aperture Radar</i> - SAR).....	8
2.2.2. Propriedades do sinal de retorno: retroespalhamento.....	9
2.2.3. Efeito <i>speckle</i>	10
2.3. Interferometria SAR.....	11
2.3.1. Contextualização.....	11
2.3.2. Técnica DInSAR <i>Time-Series</i> (DTS).....	13
2.3.3. Técnicas por espalhadores persistentes (PSI – <i>Persistent Scatterer Interferometry</i>).....	16
3 ÁREA DE ESTUDO.....	22
3.1. Localização e acesso.....	22
3.2. Aspectos fisiográficos.....	25
3.2.1. Clima.....	25
3.2.2. Vegetação.....	27
3.2.3. Solos.....	29
3.2.4. Geomorfologia.....	30
3.3. Geologia regional.....	34
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	39

4.1. Material	39
4.2. Métodos	40
4.2.1. Preparação dos dados	41
4.2.2. Processamento A-DInSAR.....	41
4.2.3. Integração de dados em ambiente SIG.....	44
4.2.4. Validação dos resultados	44
4.2.4.1. Validação através de prismas	44
4.2.4.2. Validação pelas classes geomecânicas	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1. Análise dos resultados.....	50
5.2. Validação dos resultados.....	61
5.3. Classes geomecânicas <i>versus</i> deformações.....	70
6 CONCLUSOES E RECOMENDACOES	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a produção mineral rendeu cerca de US\$ 40 bilhões no ano de 2014, representando 5% do PIB (Produto Interno Bruto) Industrial do país, fato este que pode ser explicado pela grande diversidade geológica do território brasileiro, demandando jazidas de vários minerais (IBRAM, 2015). Ainda segundo relatório apresentado pelo IBRAM (2015), a produção mineral brasileira conta com 72 substâncias minerais diversas, sendo 23 metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas, sendo um total de 8400 minas espalhadas pelo território nacional.

O Sensoriamento Remoto utilizando dados de Radares de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) orbital vem demonstrando sua importância e aplicabilidade em várias áreas consideradas estratégicas em diversos países, como em monitoramento e previsão de terremotos, mineração, entre outras.

As técnicas interferométricas SAR de extração de informação vêm surgindo como vanguarda nas aplicações SAR e traçando um novo panorama mundial, onde observa-se programas espaciais que preveem o uso de constelações de sensores radares com capacidade de prover dados que permitem realizar processamento interferométrico.

Segundo Paradella et al. (2015a), nas últimas duas décadas um número significativo de sistemas orbitais SAR foram lançados e outros estão em desenvolvimento, com capacidade de gerar dados para aplicação em interferometria diferencial, com altas taxas de revisita (operando no modo constelação) e com alta resolução espacial, condições essenciais para a detecção de movimentos superficiais lineares e não lineares de grande magnitude.

As aplicações interferométricas são as mais distintas possíveis e ainda em expansão, mas podemos citar duas aplicações principais: a geração de modelos digitais de superfície (a exemplo do modelo digital de superfície com

recobrimento global *WorldDEM*TM) e a geração de mapas de deformações superficiais através das técnicas DInSAR, PSI e SBAS.

Nas atividades minerária instabilidades de superfícies são comuns, devido ao movimento das massas de rocha e as deformações superficiais (Paradella et al. (2015b), que podem potencialmente causar instabilidades e até colapsos nas áreas em operação de minas a céu aberto. Salienta-se que o colapso de uma encosta nestas áreas, pode causar sérios danos à eq uipamentos e também enormes riscos para equipes de trabalho que estejam atuando na área, além de i mpactar nos custos de produção e na mineração com a interrupção das atividades.

Desta forma, a detecção prévia de movimentos superficiais é de grande valia para o planejamento e pr evenção de riscos em áreas de mineração. Há diversos métodos para o monitoramento, entre estes podemos citar o radar de campo, levantamento topográfico com estação total e por fim os sistemas orbitais empregando interferometria diferencial. Conforme apresentado por Paradella et al. (2015e), podemos verificar que em síntese as técnicas citadas são complementares e particularmente a interferometria SAR diferencial se mostra interessante ao planejamento e monitoramento por permitir uma visão sinóptica.

O uso da técnica de Interferometria Diferencial de Imagens SAR (DInSAR) para a deformação de monitoramento de superfície se iniciou nos anos 90 (GABRIEL et al., 1989; MASSONNET et al.,1993; PELTZER et al., 1995; ROSEN et al., 1998; STROZZI et al, 2001). Aquisições multi-temporais melhoraram a capacidade de detectar a mudança temporal dos fenômenos de deformação no tempo. Para tirar proveito da série temporal de imagens, a técnica DInSAR Time-Series (DTS) foi proposta e t em sido utilizada com sucesso (BERARDINO et al., 2002; USAI et al., 2002; SCHMIDT et al., 2003, CROSETTO et al., 2005; MURA et al., 2014).

A abordagem de alvos com espalhadores persistentes (PSI) baseia-se na identificação de pixels com propriedades de baixa dispersão de amplitude no tempo, em uma pilha de interferogramas diferenciais, permitindo uma análise temporal da fase interferométrica de alvos pontuais individuais, fornecendo uma informação precisa relacionada aos deslocamentos superficiais de cada alvo pontual (FERRETTI et al., 2001; WERNER et al., 2003).

Em meados do ano de 2010, através de projeto de pesquisa financiado pela FAPESP-Vale (Processo FAPESP 2010/51267-9), intitulado “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”, deu-se início a um trabalho inédito de pesquisa no país (PARADELLA et al., 2015b) na área de interferometria diferencial SAR. Os trabalhos de pesquisa foram iniciados em janeiro de 2012, após a formalização do convênio institucional entre a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a Vale (PARADELLA et al., 2015b).

O projeto de pesquisa supracitado foi de extrema importância ao desenvolvimento das técnicas InSAR no país, provendo dados e resultados consistentes com as expectativas do projeto. Vários artigos científicos foram publicados no decorrer dos anos de 2014 a 2017, através do grupo de pesquisa formado pelos pesquisadores do INPE, UNESP (Universidade Estadual Paulista) e UFPA (Universidade Federal do Pará), envolvidos no projeto, além das empresas TRE (Tele-Rilevamento Europa) e GAMMA Remote Sensing and Consulting AG. Durante o período do projeto, pode-se conhecer com maior profundidade a técnica de interferometria diferencial SAR, tendo sido propostas algumas melhorias, como por exemplo, a utilização da combinação de técnicas avançadas de interferometria diferencial (MURA et al., 2016). Outra possibilidade de se obter o deslocamento superficial do terreno no

eixo vertical foi aventada através do uso combinado de aquisições de imagens em orbitas ascendente e descendente (PARADELLA et al., 2015b).

Segundo Mura et al. (2016), a técnica PSI proporciona uma melhor precisão do que a técnica DTS. A primeira técnica permite um melhor modelamento da fase atmosférica (que está relacionada com a heterogeneidade no atraso do sinal do radar durante as aquisições), com isso diminuindo seu efeito na estimativa das deformações, conseguindo detectar deformações em escala milimétrica; enquanto que com a segunda técnica pode-se detectar deformações não lineares e fornecer uma informação mais homogênea e extensa da área relacionada às deformações superficiais do solo, mas à custa de uma perda de resolução espacial.

Conforme apresentado por Mura et al. (2016) para a mina N5W do Complexo Minerador de Carajás, através da aplicação integrada das técnicas DTS e PSI, foi possível a detecção de altas taxas de deformação linear e não-linear do terreno, cobrindo uma área maior do que a técnica PSI utilizada unicamente. Os resultados quando comparados à validação de prismas em campo, demonstraram a mesma tendência de deslocamento nos locais verificados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho consistiu em elaborar uma alternativa de recobrimento com espalhadores persistentes para grandes extensões de área através da combinação das técnicas de interferometria diferencial DInSAR *Time-Series* e PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*), utilizando-se para isso dados TerraSAR-X sobre o Complexo Minerador de Carajás, PA.

1.1.2. Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram:

- a. Gerar através da técnica de interferometria diferencial DInSAR *Time-Series*, disponível no software Gamma, o mapa de recobrimento completo das deformações superficiais do Complexo Minerador de Carajás em escala centimétrica;
- b. Gerar através da técnica de interferometria diferencial PSI com o módulo IPTA, disponível no software Gamma, o recobrimento completo das deformações superficiais do Complexo Minerador de Carajás, a partir da série temporal oriunda do processamento do DInSAR *Time-Series* em escala milimétrica;
- c. Validar as deformações superficiais obtidas com o apoio de dados medidos de prismas com estação total em campo, fornecidos pela mineradora Vale;
- d. Validar as deformações superficiais com o apoio de dados geomecânicos fornecidos pela Vale S.A.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Mineração no país

2.1.1. Contextualização

A mineração desempenha importante papel na macroeconomia brasileira, onde em escala nacional, esta representa um dos vários setores que sustentam o desempenho econômico. Frequentemente, observa-se que a maioria das áreas de extração de minério encontra-se em regiões muitas vezes rurais e/ou pouco desenvolvidas, na qual a mineração torna-se a atividade econômica predominante, gerando grande impacto social e econômico (ICMM, 2012).

2.1.2. Região amazônica

O extenso território amazônico não conta somente com a exuberância de suas florestas naturais, mas também conta com uma diversificada variedade de minerais. Especialmente pode-se observar um aspecto relevante da região, adicionado ao seu grande potencial metalogenético primário, que é a ação do clima tropical sobre as rochas fracamente mineralizadas. O intemperismo na região ocorre de maneira acelerada devido a constante presença de água e ácidos orgânicos formados pela floresta e o calor resulta em formações espessas de mantas de solo com até 300 metros de espessura, que reconcentram minérios com teores altíssimos. Depósitos estes que por estarem próximos a superfície possibilitam uma extração de baixo custo e beneficiamento, acarretando em elevada lucratividade (PARADELLA et al., 2015d).

Um dos estados mais importantes para a mineração do país é o Pará, este que é o segundo maior estado em extensão territorial, mas em contrapartida é um dos menos desenvolvidos, ocupando o 22º lugar entre os 26 estados da União em termos de renda *per capita*. Devido ao seu enorme potencial em recursos naturais, tem-se sinalizado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) que

boa parte dos investimentos em mineração é destinado ao estado do Pará (ICMM, 2012). Destaca-se a grande importância da Serra dos Carajás para a mineração do país, particularmente devido as suas grandes reservas de minério de ferro de alto teor.

2.1.3. Segurança e planejamento minerário

Seguindo as Normas Reguladoras de Mineração (NRM) (BRASIL, 2001), aprovada pela portaria n.º 237 de 18 de outubro de 2001, cabe ao empreendedor elaborar e executar planos de lavra e procedimentos, os quais propiciem a segurança operacional da mina e a proteção dos trabalhadores, além da preservação ambiental (Parágrafo 1.4.1.5 da portaria n.º 237/2001).

Ainda seguindo a NRM, consta em seu parágrafo 1.4.1.7, que compete ao empreendedor ou ao responsável pela mina: a interrupção de todo e qualquer tipo de atividade a qual exponha os trabalhadores a condições de risco grave e iminente para sua saúde e segurança. Vale ressaltar que também é necessário ao empreendedor a elaboração e implementação de um Programa de Gerenciamento de Riscos – PGR, que deve conter no mínimo alguns itens listados na NRM, entre estes destacam-se as alíneas I e II do parágrafo 1.4.1.10 sobre a estabilidade do maciço e outros resultantes de modificações e introduções de novas tecnologias, respectivamente (BRASIL, 2001).

2.1.4. Mineração a céu aberto

Focando nas condicionantes da mineração a céu aberto, em especial o método de bancadas, citam-se cuidados especiais pela NRM (BRASIL, 2001), uma vez que este tipo de mineração sofre com maior facilidade com a intempérie do meio na qual está alocada, contudo ainda é um dos métodos economicamente e tecnologicamente mais viáveis. No caso de Carajás, devido às suas características geológicas com minério de ferro próximo a superfície, adotou-se a lavra a céu aberto.

Na mineração a céu aberto temos como grande fator impactante das atividades mineradoras a ocorrência de instabilidades, sejam em taludes de cava, pilhas de estéril, rejeitos e/ou ainda de minérios, e também em casos mais agravados a ocorrência de rompimentos e escorregamentos. A compreensão destes fatores é de suma importância, uma vez que pode acarretar em perdas de pessoal e de bens materiais (READ e STACEY, 2009).

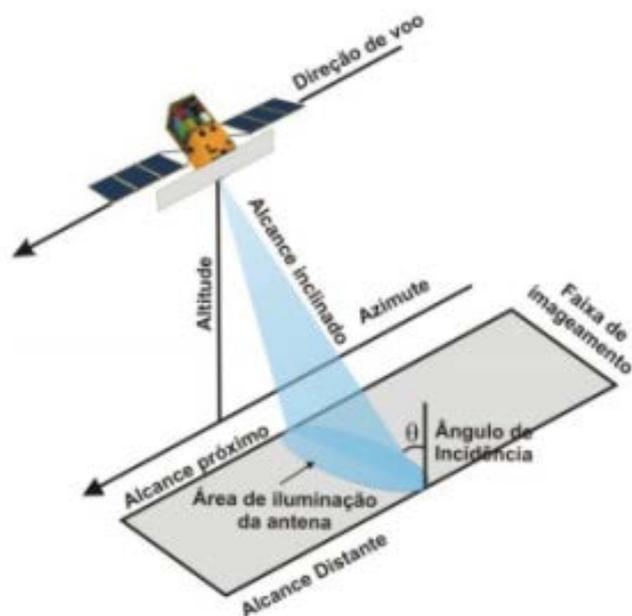
Em Carajás, conforme citado por Paradella et al. (2015d), existem cavas profundas de extração mineral, devido a distribuição espacial dos corpos de minério, com grande potencial para problemas de estabilidade de taludes quando da sua acomodação. Tem-se também a necessidade de adaptação quando do uso de explosivos, de forma a minimizar fraturamentos desnecessários das paredes, além do controle da ação da água sobre estes (PARADELLA et al., 2015d).

2.2. Caracterização das imagens SAR

2.2.1. Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*)

O Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) consiste em um sistema ativo de imageamento, nas quais os sensores, instalados em plataformas orbitais ou aerotransportados, produzem a sua própria iluminação, gerando as frentes de onda para a interação com a superfície, trabalhando na faixa de energia das microondas no espectro eletromagnético, independentemente da radiação solar. A alta resolução da imagem SAR na direção de azimute é obtida através da técnica conhecida por Abertura Sintética. Esta técnica permite obter imagens de radar com alta resolução espacial a grandes distâncias, a partir da observação lateral das áreas imageadas, retornando sinais retroespalhados por diferentes objetos da superfície em diferentes momentos, possibilitando a detecção destes (Figura 2.1).

Figura 2.1. Geometria de um sistema SAR.



Fonte: Pinto (2015).

Atualmente há uma grande gama de sensores SAR orbitais lançados e previstos para lançamento, buscando configurações que melhor atenda a comunidade de usuários finais. Diversas configurações para as mais variadas aplicações podem ser vistas em Paradella et al. (2015a).

2.2.2. Propriedades do sinal de retorno: retroespalhamento

Os valores de intensidade de cada pixel nas imagens SAR representam uma estimativa da quantidade de energia retroespalhada pelo alvo da superfície, onde áreas escuras representam retroespalhamento baixo ou valores baixos de amplitude, inversamente às áreas mais claras. Segundo Nievinski (2004) e Woodhouse (2006), os principais fatores que definem a intensidade do sinal retroespalhado são a rugosidade superficial, forma, geometria de aquisição e a permissividade elétrica complexa do alvo. Estes fatores determinam maior ou menor intensidade de leitura pelo sensor do sinal de retorno retroespalhado.

A geometria de aquisição de um SAR é dada por dois fatores complementares: azimute de visada e ângulo de incidência local. Em latitudes próximas a linha

do Equador, temos os principais sensores SAR orbitais trabalhando com o azimute de visada próximos à 80° para órbitas ascendentes (seguem do pólo sul ao pólo norte) com visada lateral à Leste, e à 280° para órbitas descendentes (seguem do pólo norte ao pólo sul) com visada lateral à Oeste (PARADELLA, 2015c).

Associa-se ao ângulo de incidência alguns erros de deslocamento topográfico nas imagens SAR: encurtamento de rampa ou *foreshortening*, que é dado quando temos a declividade do terreno menor que a incidência local; inversão do relevo ou *layover*, que é ocasionado quando a declividade do terreno é maior que a incidência local da frente de onda. A geometria de aquisição dos dados SAR pode ocasionar efeitos de sombra devido ao relevo da localidade. Este efeito é dado por áreas oclusas ou também conhecido como sombra na rampa reversa à frente de ondas.

A permissividade elétrica de um dado alvo pode modificar a sua intensidade de energia de retorno. Segundo Woodhouse (2006), a permissividade elétrica complexa de um dado alvo, seria a influência na capacidade deste material absorver energia em microondas, afetando assim o retroespalhamento. A permissividade elétrica e a constante dielétrica são altamente dependentes da umidade ou conteúdo de água líquida existente no meio, da forma estrutural e também do comprimento de onda da radiação incidente neste.

2.2.3. Efeito *speckle*

O Radar de Abertura Sintética é um sistema coerente, com isto produz um ruído chamado *speckle*. Tal efeito é descrito como uma flutuação estatística ou incerteza associada com o brilho de cada célula de resolução da imagem capturada, nas quais amplitude e fase do sinal de retorno resultam da soma vetorial coerente dos sinais retroespalhados de vários difusores contido em cada célula de resolução (FREITAS et al., 2003).

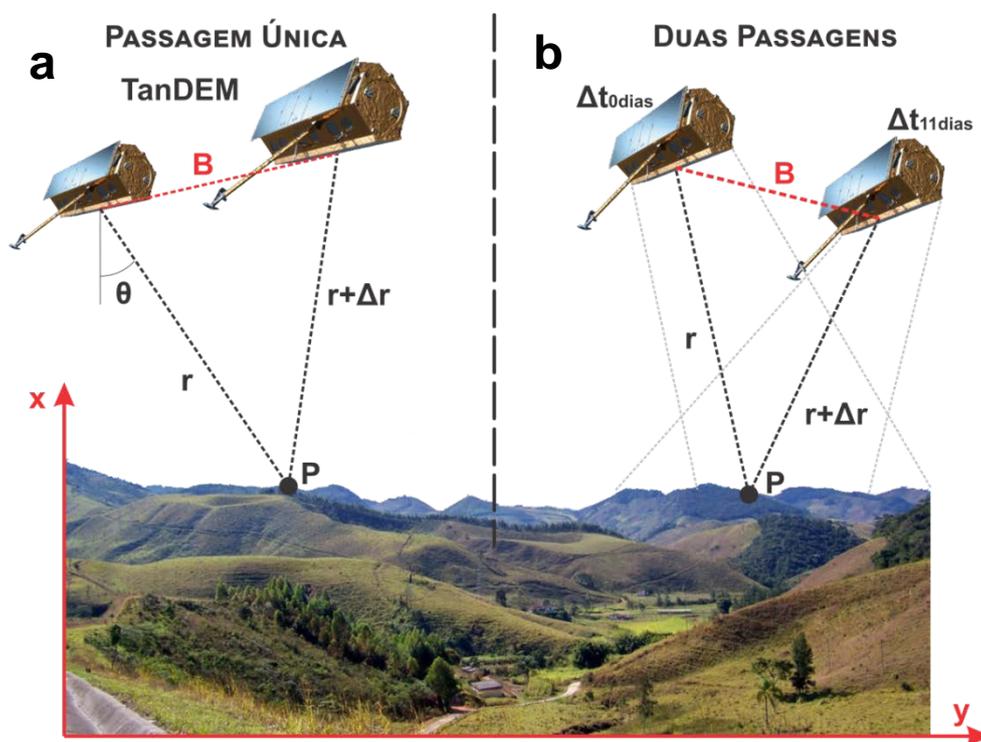
Segundo apresentado por Freitas et al. (2003), o efeito *speckle* apresenta nas imagens uma aparência granular, caracterizado por mudanças bruscas de níveis de cinza entre um pixel e outro. O efeito *speckle* é considerado um ruído multiplicativo e aleatório.

2.3. Interferometria SAR

2.3.1. Contextualização

A técnica de interferometria SAR é descrita como a interação de ecos recebidos por duas ou mais antenas, separadas no espaço por uma linha-base (do inglês *baseline*), a qual pode ser descrita como a distância adequada que separa as antenas no espaço. A *baseline* interferométrica (B) pode ser obtida de duas formas: através de uma passagem do sensor (Figura 2.2 a), nas quais as antenas operam conjuntamente, ou através de duas passagens (datas distintas) (Figura 2.2 b) (MURA, 2000).

Figura 2.2. Interferometria de passagem única e de duas passagens.

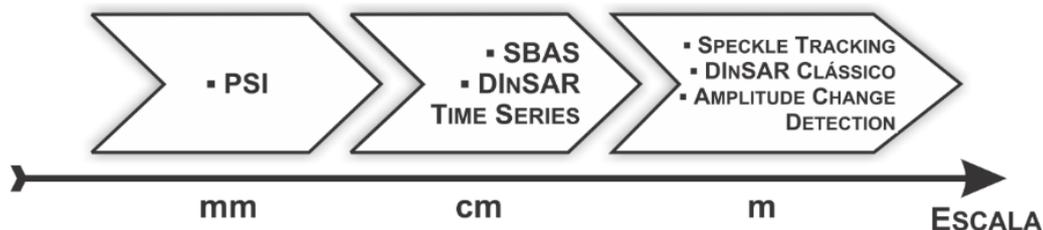


Fonte: Produção do autor.

O interferograma é formado pela diferença de fase entre os pixels no formato complexo de mesma posição nas duas imagens (corregistradas), oriundas dos ecos recebidos por cada um dos sensores. A diferença de fase é a medida fundamental das técnicas de Interferometria SAR (InSAR). A diferença de fase das imagens complexas SAR apresentam um padrão resultante do tipo franjas, resultante do carácter cíclico da fase, variando entre 0 e 2π , para que seja possível a obtenção da altitude do terreno, as diferenças de fase são recalculadas através do processo de desdobramento de fase (do inglês *phase unwrapping*), do qual se obtém a chamada fase absoluta (GOLDSTEIN et al., 1988).

A técnica InSAR já é uma tecnologia operacional para a geração de Modelos Digitais de Superfície - MDS (do inglês, *Digital Surface Model - DSM*), bem como associada a grande evolução da tecnologia A-DInSAR (*Advanced-Differential SAR*), com especial destaque a técnica de Espalhadores Persistentes Interferométricos (*PSI – Persistent Scatterer Interferometry*), a qual vem cada vez mais se firmando como tecnologia operacional na detecção e monitoramento de deformações superficiais do terreno. Atualmente, além da geração de modelos digitais de elevação, podemos subdividir a interferometria SAR dentro de um regime escalar de detecção de deformações, indo da detecção de movimentações milimétricas até escalas de ordem métrica (Figura 2.3) (PARADELLA et al., 2015a).

Figura 2.3. Classificação da tecnologia InSAR na detecção de deformações.



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

2.3.2. Técnica DInSAR *Time-Series* (DTS)

A técnica DInSAR *Time-Series* (DTS) pode ser descrita como uma evolução da técnica DInSAR clássica, na qual utiliza-se de um número redundante de interferogramas diferenciais, de forma a determinar espacial e temporalmente o deslocamento da superfície visada, podendo-se separar a informação de deformação desejada do erro de topografia, atraso atmosférico e do ruído (MURA et al., 2014).

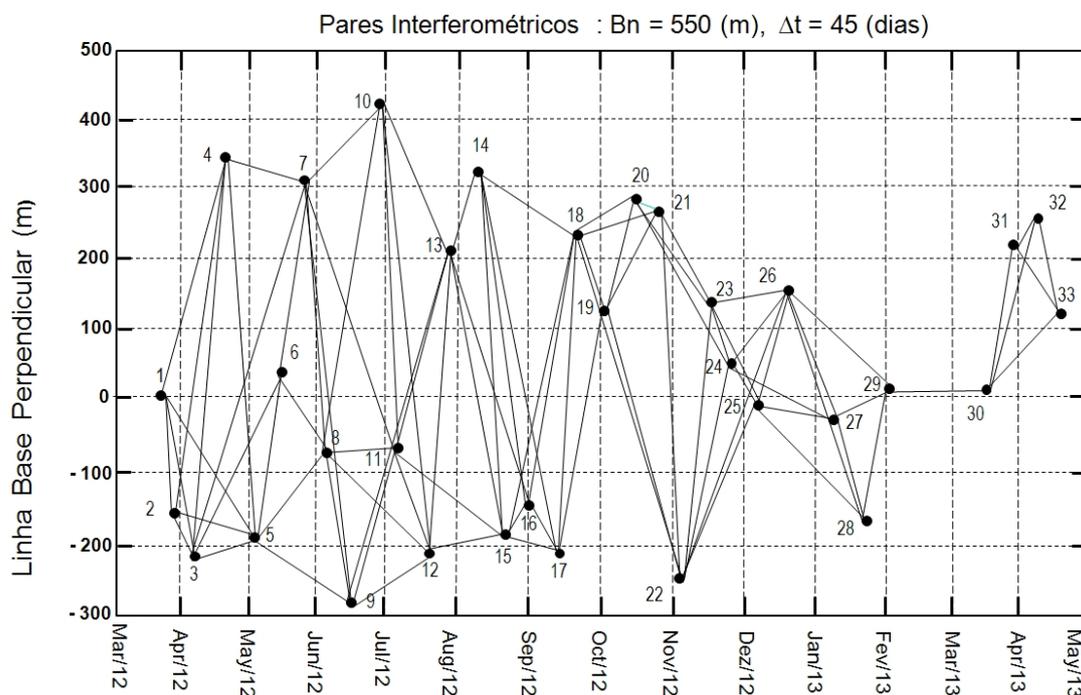
Conhecendo-se as posições das órbitas do satélite e a topografia da superfície, é possível subtrair a componente da fase topográfica do interferograma para medir deformações. Realizando este procedimento, a fase restante no interferograma diferencial é devida as contribuições do deslocamento do solo entre as aquisições, juntamente com outras componentes de fase indesejáveis, representada por:

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

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

A quantidade de interferogramas é construída através das escolhas dos limites de linha de base e do intervalo de tempo entre as aquisições, como pode ser visto no caso no exemplo da Figura 2.4, na qual 33 imagens do satélite TerraSAR-X foram utilizadas, com o limite da linha de base de 550 metros e intervalo entre as aquisições de 45 dias. Posteriormente são selecionados os interferogramas que apresentam a melhor coerência interferométrica média (grau de correlação entre as imagens) (MURA et al., 2014).

Figura 2.4. Exemplo de configuração de interferogramas diferenciais para 33 imagens do TerraSAR-X.



Fonte: Mura et al. (2014).

Um conjunto de M interferogramas diferenciais são utilizados, construídos a partir de um conjunto de $N+1$ imagens SAR, adquiridas em ordem temporal (t_0, t_1, \dots, t_N), na qual cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δt), como representado na equação (1), e tomando-se um ponto como referência, localizado em uma área estável, e um ponto genérico selecionado, os valores a fase (interferogramas) desdobradas observados neste ponto em relação ao ponto de referência, pode ser representado através de um vetor de M elementos, segundo a equação (2):

$$\phi_{Ob}^T = [\phi_{\Delta t 1}, \phi_{\Delta t 2}, \dots, \phi_{\Delta t M}] \quad (2)$$

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

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

A relação entre o deslocamento (3) e os dados observados (2) pode ser representada como um sistema de M equações de N variáveis desconhecidas, na seguinte forma matricial:

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

em que A é uma matriz de dimensão NxM de operadores de adição, subtração e ausência (1, -1, 0) entre os pares interferométricos. A solução do sistema de equações (4) pode ser obtida, no sentido de Mínimos Quadrados (USAI, 2002), por:

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

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

No caso de se utilizar um grande número de pares interferométricos diferenciais, para aumentar a amostragem temporal, o sistema de equações em (5) torna-se mal condicionado, por consequência, o sistema terá infinitas soluções. Para solucionar este problema, o sistema em (5) pode ser invertido mediante a aplicação do método *Singular Value Decomposition* (SVD) (GOLUB e VAN LOAN, 1989). O resultado de (5), ou seja, deslocamento de superfície no sentido da linha de visada do radar (LoS), pode apresentar algumas descontinuidades no intervalo de tempo em estudo, que não faz sentido no estudo de deformações. Uma solução mais eficaz foi obtida através da minimização da norma do vetor velocidade de deslocamento proposto por Bernardino et al. (2002), gerando com isto um mapa de velocidade de deformação da área imageada.

A principal desvantagem desta técnica refere-se a necessidade de reamostrar os dados de entrada (processamento *multi-look*) para a geração dos interferogramas, degradando assim a resolução espacial. Como vantagem, temos o aumento da coerência interferométrica, possibilitando a abrangência

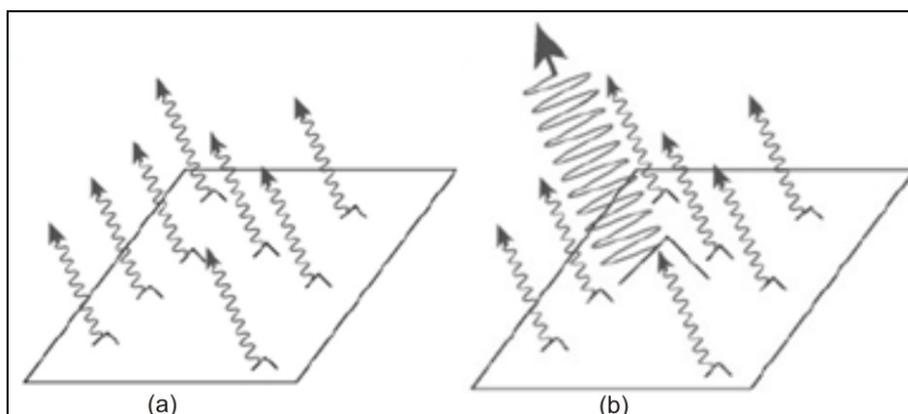
de grandes extensões em área, mostrando uma visão sinóptica da deformação da localidade em estudo (PARADELLA et al., 2015d).

2.3.3. Técnicas por espalhadores persistentes (PSI – *Persistent Scatterer Interferometry*)

A técnica PSI foi originalmente desenvolvida no Instituto Politécnico de Milão – POLIMI, Itália, com o nome de PSInSAR™, e buscou sobretudo a remoção das componentes da fase atmosférica. Esta técnica foi inicialmente formulada por Ferretti et al. (1999, 2000) e representa uma das mais avançadas técnicas de interferometria diferencial. Seguindo a mesma abordagem da proposição inicial, variações têm sido apresentadas em anos recentes (FERRETTI et al., 2001; COLESANTI et al., 2003; WEGMULLER et al., 2004; HOOPER et al., 2004; CROSETTO et al., 2005; CROSETTO et al., 2008).

Espalhadores persistentes são alvos que refletem energia em várias direções de tal forma que são visíveis ao SAR, e apesar de variações em órbita, estes espalhadores se apresentam estáveis (Figura 2.5). Típicos espalhadores persistentes são estruturas geométricas funcionando como refletoras de canto (diedros, triedros) presentes em obras e construções (telhados, lajes, etc.), estruturas verticais (postes, estatuas, etc.), afloramentos de rochas, etc.

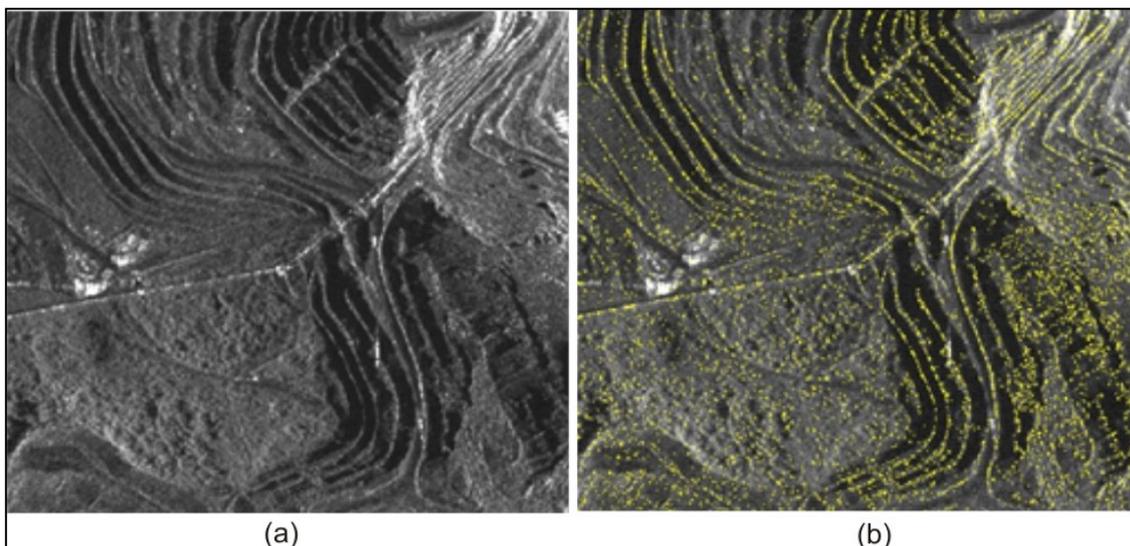
Figura 2.5. Ilustração do comportamento da fase para pixel com espalhadores distribuídos (a) e para pixel com espalhadores coerentes (persistentes) (b).



Fonte: Adaptado de Hooper et al. (2007).

A técnica PSI utiliza um grande número de imagens registradas temporalmente (tipicamente mais de 15), para que seja possível realizar uma análise estatística dos erros de fase relacionados à atmosfera e ruídos. Inicialmente selecionam-se os pixels candidatos a PS (*Persistent Scatterer*), que são aqueles que normalmente apresentam alta relação sinal-ruído e são identificados através da análise da variação da amplitude, pixel por pixel, na série de imagens. A partir deste conjunto, cada *pixel* candidato a PS é testado em termos de sua estabilidade de fase na série temporal. A Figura 2.6 ilustra um exemplo de pontos candidatos a PS.

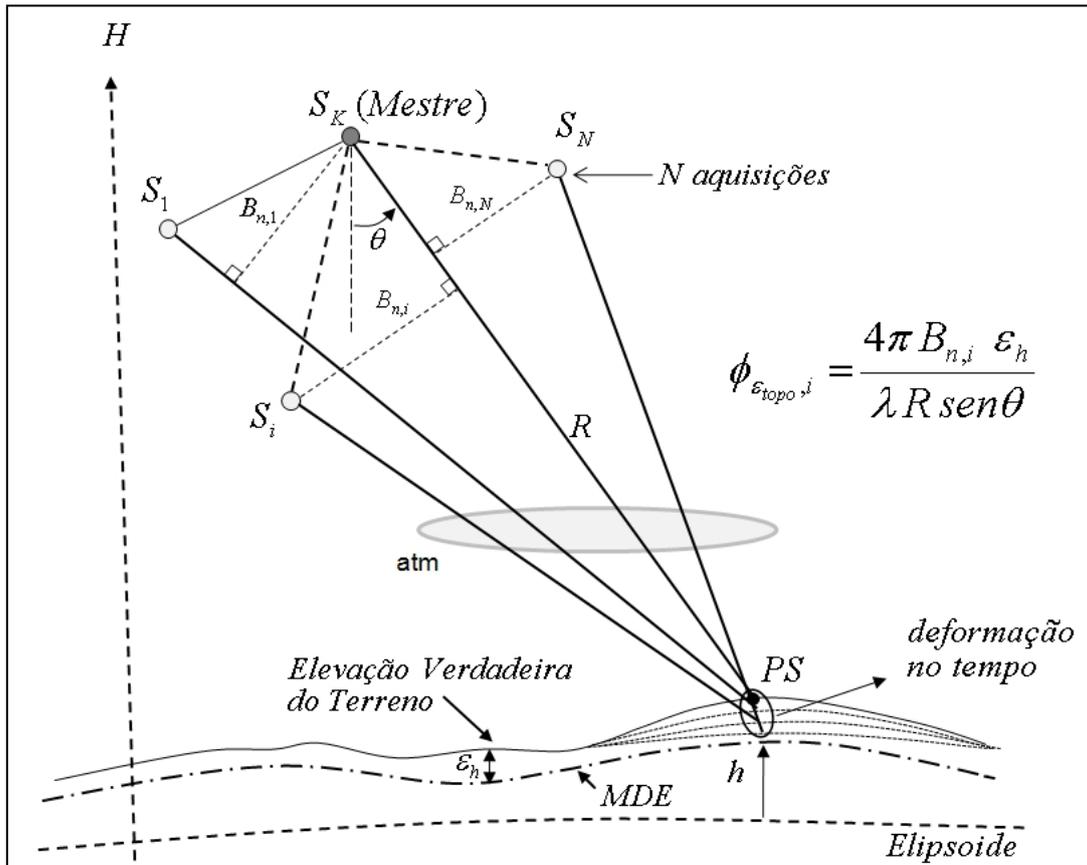
Figura 2.6. (a) Imagem StripMap do TSX-1 e (b) candidatos a PS representados pelos pontos na cor amarela da mesma área.



Fonte: Paradella et al. (2015d).

A combinação das imagens para formar o conjunto de imagens interferométricas (pilha de imagens) é realizada inicialmente pela escolha de uma imagem mestre, em geral a imagem no centro da série temporal para que a coerência interferométrica seja maximizada. A Figura 2.7 ilustra um exemplo de configuração para três linhas-bases normais B_n em relação a imagem mestre (SM).

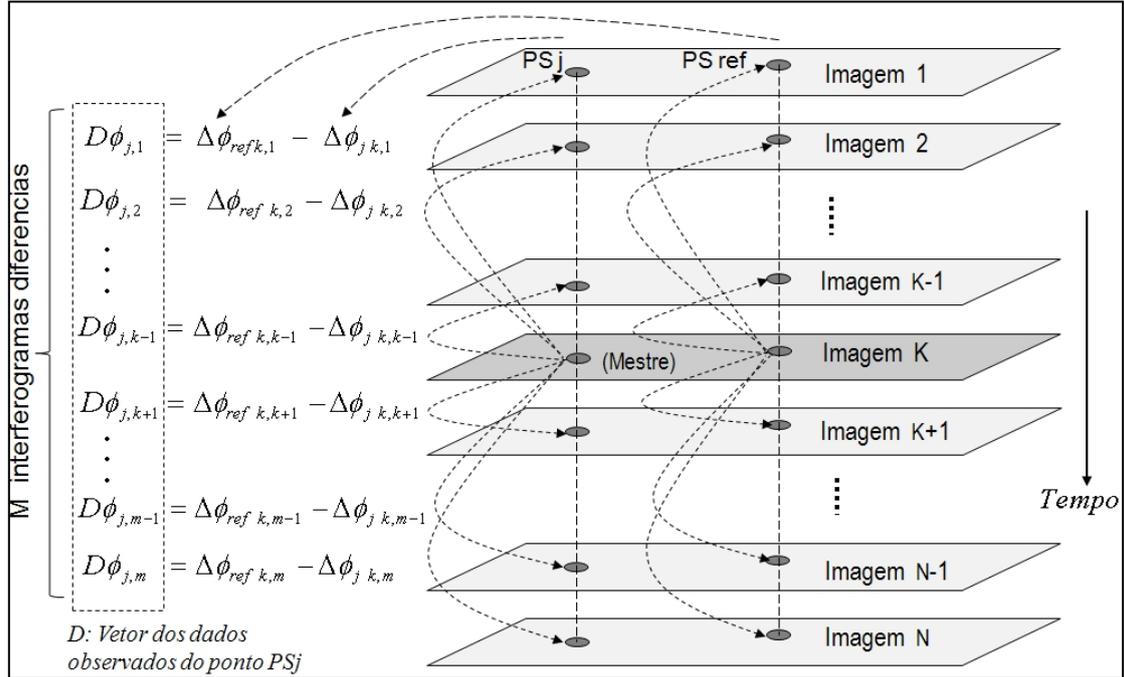
Figura 2.7. Exemplo de configuração de 3 linhas de base em relação a imagem mestre.



Fonte: Paradella et al. (2015d).

A Figura 2.8 ilustra a configuração típica de um conjunto de imagens utilizadas na metodologia PSI, que formam uma pilha de N imagens, estas as quais são adquiridas sequencialmente no tempo e primeiramente são coregistradas. Posteriormente é selecionada a imagem de referência, denominada pelo índice genérico K na Figura 2.8, que representa a imagem mestre para todos os interferogramas que serão gerados. Esta imagem é selecionada com base no critério de menor dispersão de linha de base e estar na proximidade do centro do intervalo de aquisições. Um ponto de referência é escolhido na imagem (PS_{ref}), com a propriedade de ser um PS estável (não ocorre deformação no intervalo da série temporal de imagens) na área de estudo.

Figura 2.8. Exemplo de configuração de linhas de bases em relação a imagem mestre.



Fonte: Paradella et al. (2015d).

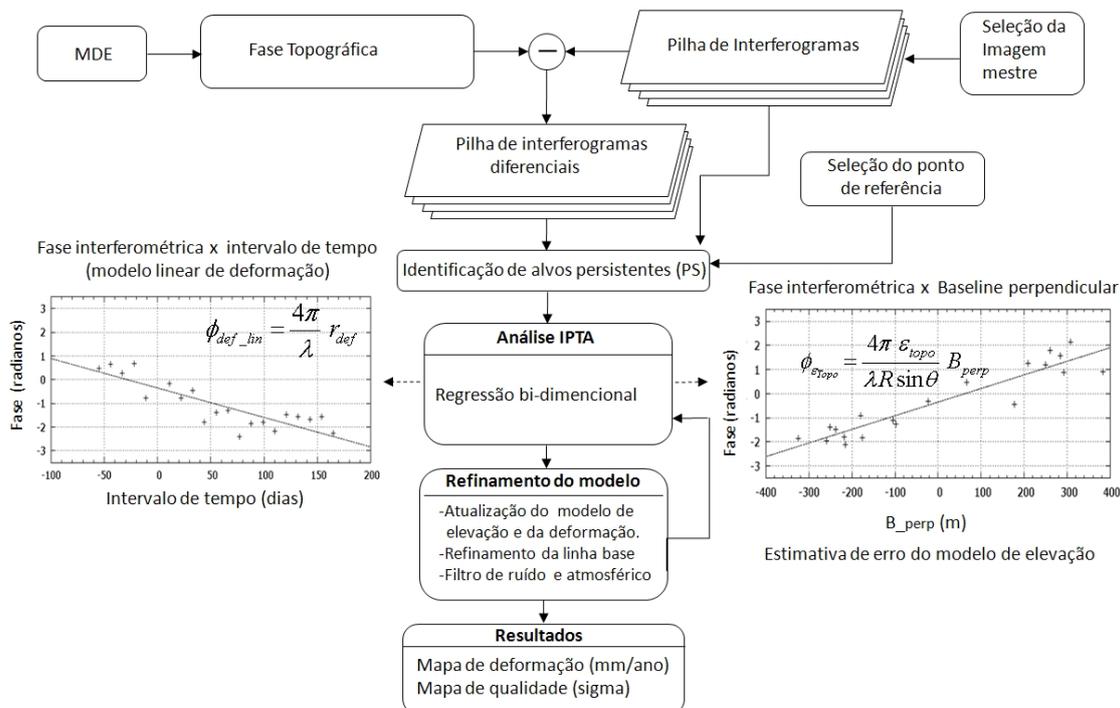
Para um PS_j , genérico as fases relacionadas a imagem de referência, correspondente aos M interferogramas ($M=N-1$) e ao PS de referência (PS_{ref}) são combinadas, como ilustrado na Figura 2.8 para formar o vetor de fase diferencial $D_{\phi_{PS}}$. Cada uma das M componentes do vetor de fase diferencial pode ser desmembrado como a somatória das contribuições relacionadas a deformação do ponto PS_j (def), a fase devido a erro no modelo digital de superfície neste ponto (ϵ_{topo}), a fase introduzida pela atmosfera (atm) e a fase devido a ruídos (ruído), formando um sistema de M equações, representada na equação que segue.

$$D\phi_{PS_j} = \phi_{PS_j_def} + \phi_{PS_j_e_{topo}} + \phi_{PS_j_atm} + \phi_{PS_j_ruído} \quad (6)$$

Neste trabalho a proposta de solução da determinação da deformação de cada ponto genérico PS_j será baseada na abordagem IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*), utilizada para estimar o vetor deformação (def) de cada ponto PS, representado na equação 6. A solução consiste em explorar algumas

características das componentes de fase, visando a separação ou atenuação de cada uma delas. A Figura 2.9 ilustra as várias etapas do processamento utilizados na metodologia IPTA para estimar a deformação de cada PS.

Figura 2.9. Ilustração da modelagem de processamento da metodologia IPTA.



Fonte: Paradella et al. (2015d).

A metodologia IPTA é baseada em uma regressão linear bidimensional (2D) dos dados relacionados a fase diferencial de cada PS, como ilustrado na Figura 2.9. Primeiramente é realizado o desdobramento de fase no sentido temporal, em seguida, é explorada uma característica importante da fase relacionada ao erro do modelo digital de superfície, a sua dependência linear com a linha de base normal das várias aquisições, ou seja, fase versus B_{perp} . A segunda regressão linear do modelo 2D é referente a deformação, que é assumida ser linear no tempo, ou seja, fase versus tempo.

A atenuação da fase relativa a atmosfera é realizada através de filtros que levam em conta as características desta componente de fase, de ser altamente correlacionada espacialmente na extensão da imagem (varia suavemente) e

totalmente descorrelacionada temporalmente (a atmosfera muda a cada aquisição do satélite). A atenuação do ruído de fase é realizada através de uma filtragem temporal do tipo passa baixa, ou seja, somente componentes de baixas frequências são preservados.

Com as duas componentes de fase dos resíduos atenuadas, o que resta está relacionada a componente de fase devido a deformação não linear. No final do processamento as componentes de fase linear (determinada pela regressão linear) e a não linear são adicionadas, fornecendo a componente de fase estimada pela metodologia IPTA.

A técnica PSI possui algumas outras limitações, como por exemplo, a impossibilidade de detectar deslocamentos puros na direção vertical ou horizontal, quando se utiliza apenas uma órbita (ascendente ou descendente). Outra limitação está relacionada a geometria de imageamento, na qual podem ocorrer efeitos das distorções devido a configuração do imageamento (*foreshortening* e/ou *layover*) ou também áreas oclusas.

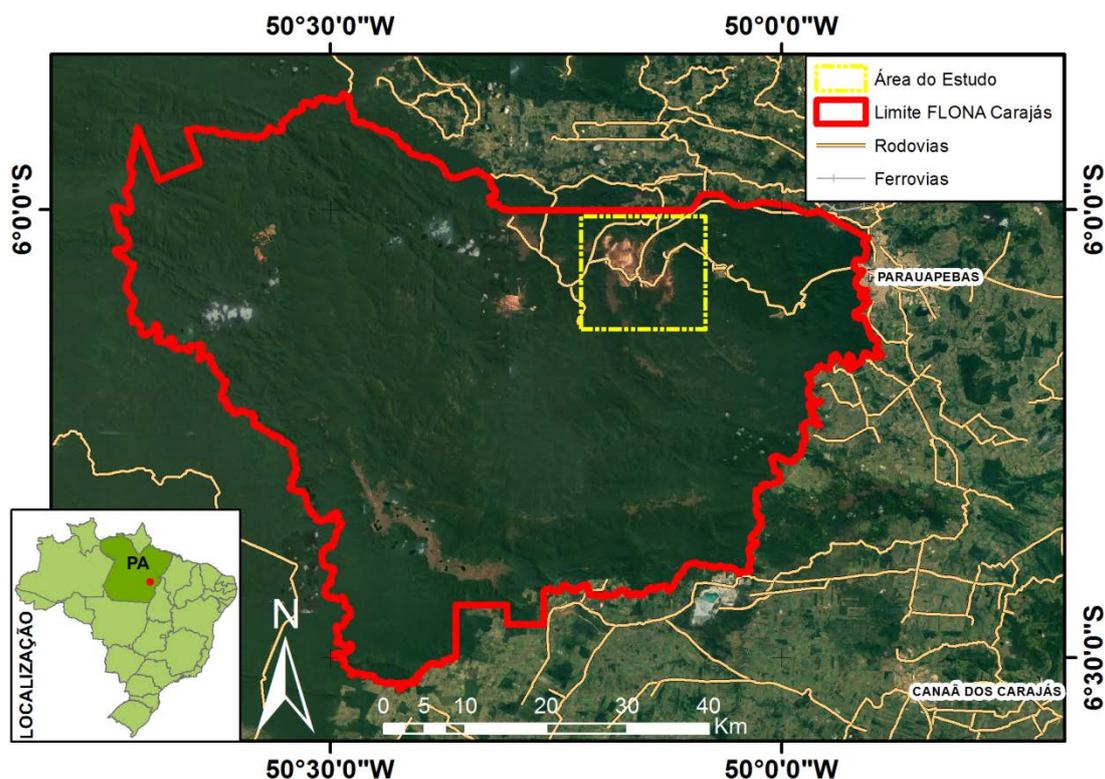
No caso da utilização da metodologia IPTA para a solução PSI, a principal limitação é a pouca abrangência da área processada, ou seja, está limitada a pequenas áreas devido à variação da fase atmosférica em áreas mais extensas, impondo limites a sua utilização em áreas de grande extensão.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização e acesso

A área de estudo está localizada no interior da Floresta Nacional (FLONA) de Carajás na cidade de Parauapebas (Figura 2.10), estado do Pará, região norte do país. A FLONA de Carajás, criada pelo Decreto n.º 2.486 de 02 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998), é uma Unidade de Conservação (UC) que compõe o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), instituído pela Lei Federal n.º 9.985, de 18 de julho de 2000 (BRASIL, 2000).

Figura 3.10. Localização e acessos para a FLONA de Carajás.



Fonte: Produção do autor.

No SNUC há estabelecido dois grupos distintos de categorização de Unidades de Conservação: Proteção Integral e Uso Sustentável. Para o caso da FLONA Carajás, enquadrou-se esta na categoria de Uso Sustentável, onde

basicamente compatibiliza-se a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos recursos naturais existentes na localidade (BRASIL, 2016).

O acesso a localidade é realizado pelo município paraense de Parauapebas, localidade onde está inserido o Núcleo Urbano de Carajás, a cerca de 645 km da capital Belém. O acesso terrestre dá-se precisamente pelas rodovias PA-475, PA-150 e PA-275, que corta o município adentrando a FLONA até a área de mineração do Complexo Minerador de Carajás (Figura 3.10).

Conforme o Plano de Manejo da FLONA de Carajás (BRASIL, 2016), o acesso a Carajás pode ser realizado pelas rodovias (Figura 3.11), ferrovias e também com transporte aéreo, entretanto há a necessidade de autorização junto à Vale ou ao ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade).

Figura 3.11. (A) Vista aérea da Rodovia de acesso ao Núcleo Urbano e (B) Trecho da Rodovia Raymundo Mascarenhas.



Fonte: Brasil (2016).

Segundo Mesquita (2014), Parauapebas é a cidade com população superior à 100.000 habitantes que mais cresceu no país. Seu PIB expandiu 144% entre os anos de 2008 e 2011 (o PIB do restante do país cresceu em média 10%).

O PIB municipal de Parauapebas já ultrapassou o da capital Belém, sendo até maior que o PIB de alguns estados brasileiros (Tocantins, Roraima, Acre e

Amapá). Outro fator importante do município é a exportação, que em 2013 foram cerca de 10 bilhões de dólares em divisas de minérios embarcados.

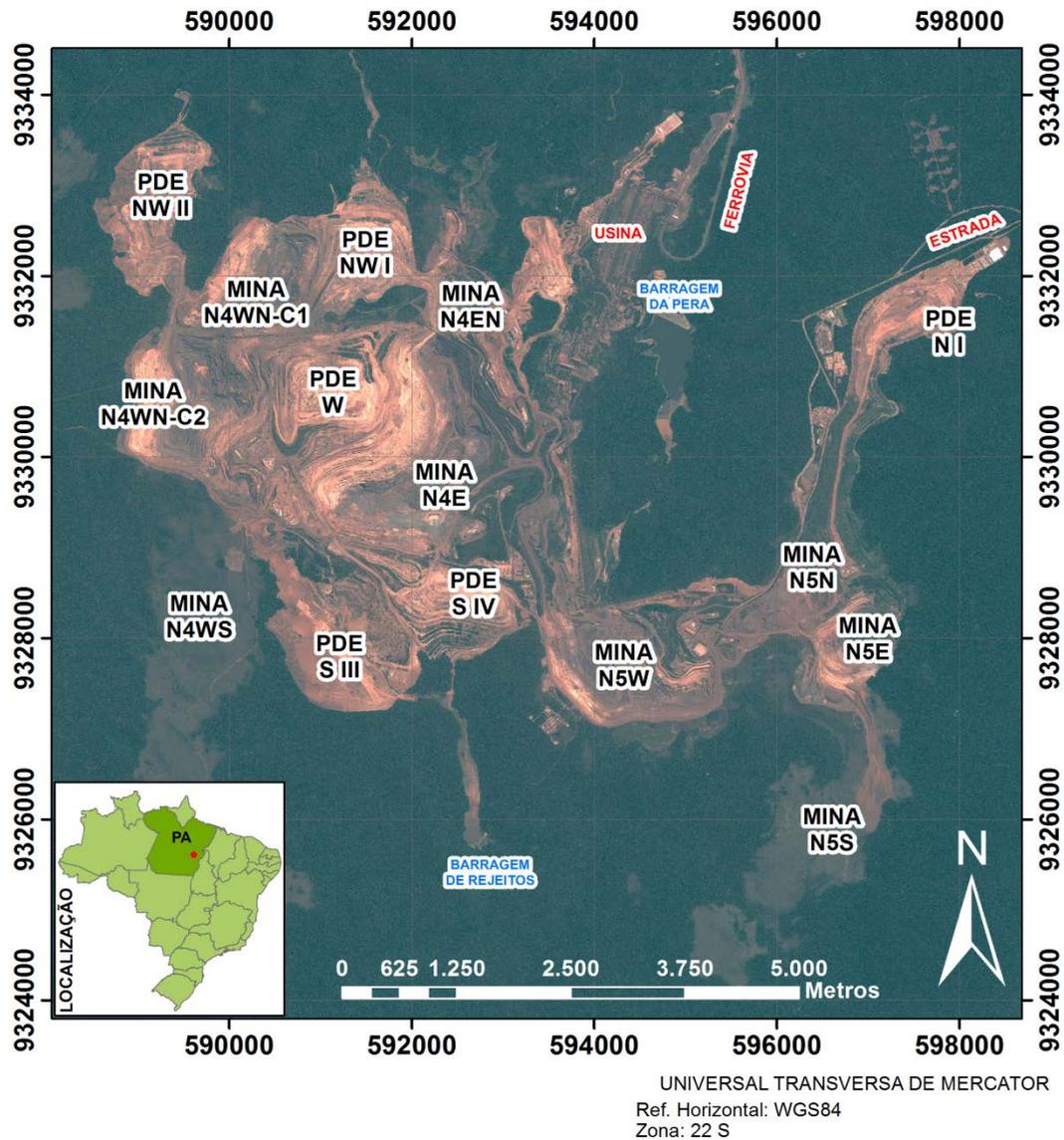
A principal, senão única, atividade econômica do município é a exploração das jazidas de Carajás pela companhia Vale. Em 2013 a movimentação financeira devido a mineração em Parauapebas girou em torno de 28 bilhões de reais, rendendo à cidade cerca de 450 milhões em compensação financeira.

O Complexo Minerador de Ferro de Carajás é um dos maiores projetos de mineração ferrífera a céu aberto do mundo. Pela complexidade logística do empreendimento, o projeto foi subdividido em áreas distintas para realização de controle prévio quando da operação. Na figura 3.12, pode-se observar a organização do Complexo Norte, área de aplicação do estudo, composta pelas minas, infraestruturas e pilhas de rejeito/estéril.

Segundo a Academia Brasileira de Ciências (ABC, 2016), a produção brasileira de ferro é de cerca de 400.822.000 t/ano, o que eleva o país ao segundo lugar mundial no quesito exportação desta *commodity*. Conforme a mesma publicação supracitada, considerando dados da produção de 2013, o complexo minerador de Carajás, através dos corpos N4W, N4E e N5, produziu um total de 105 milhões de toneladas do minério (ABC, 2016).

Segundo dados do governo do estado paraense, a principal riqueza do estado é baseada no extrativismo mineral (ferro, bauxita, manganês, calcário, ouro e estanho), sendo na região sudeste do Pará onde a atividade é preponderante, principalmente com destaque a cidade de Parauapebas como grande produtora (GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ, 2010).

Figura 3.12. Complexo Minerador de Carajás e a subdivisão das minas.



Fonte: Produção do autor.

3.2. Aspectos fisiográficos

3.2.1. Clima

O clima na localidade da Serra dos Carajás caracteriza-se com taxas de umidade relativa e de precipitação que mantém a floresta suficientemente úmida, auxiliando na manutenção do ecossistema local (BRASIL, 2016).

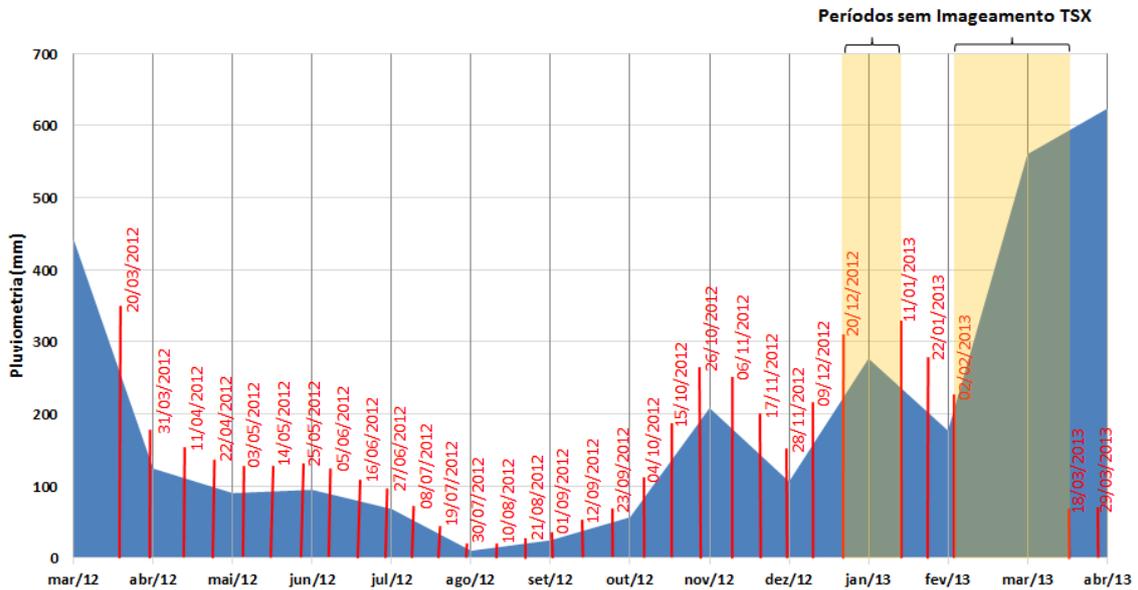
Segundo o Plano de Manejo, na localidade da FLONA, predomina-se o clima do tipo montano ou serrano amazônico, com temperaturas médias girando em torno de 21 a 22°C, mantendo-se abaixo das temperaturas apresentadas nos municípios próximos (BRASIL, 2016).

A estação chuvosa na localidade chega a concentrar cerca de 80% da precipitação pluviométrica esperada para o ano, ocorrendo rotineiramente entre os meses de novembro a abril, caracterizando duas épocas distintas na FLONA: Estação Chuvosa, com ocorrência entre novembro e abril; e a Estação Seca, ocasionada entre os meses de junho a setembro (BRASIL, 2016), como podemos verificar no gráfico pluviométrico para o período do estudo na Figura 3.13, com dados fornecidos pela empresa Vale S.A.

A amplitude de temperaturas é tida como baixa, porém contamos com temperaturas mais amenas entre os meses de janeiro a março, e registram-se as maiores temperaturas anuais entre os meses de junho a agosto (BRASIL, 2016).

Segundo informações disponibilizadas pela empresa VALE S.A., a estação automatizada que se encontra nas proximidades da mina de N4E, registrou a maior precipitação acumulada do ano de 2012 para o mês de março, que atingiu cerca de 442,00 mm de pluviometria. Observou-se também que a maior ocorrência de precipitação acumulada no período do projeto ocorreu no mês de abril de 2013, atingindo cerca de 623,50 mm de pluviometria (Figura 3.13).

Figura 3.13. Índice pluviométrico para o Complexo Minerador de Carajás no período de estudo e as datas de imagens TSX-1 disponíveis.



Fonte: Adaptado de Paradella et al., 2015d.

3.2.2. Vegetação

A FLONA de Carajás está inserida nos domínios da Floresta Amazônica, predominando em sua cobertura fisionomias de Florestas Ombrófila Densa (Montana e Submontana) e Ombrófila Aberta (Submontana) (BRASIL, 2012).

Conforme os estudos apresentados no Plano de Manejo da área (BRASIL, 2016), numa escala mais detalhada, têm-se a configuração de uma vegetação herbáceo-arbustiva de elevada caducifólia sazonal, remetendo a localidade um aspecto savânico-estépico, com principal ocorrência sobre os afloramentos ferruginosos, com diferentes fisionomias em seus substratos (Figura 3.14).

Figura 3.14. Afloramento ferruginoso em Carajás.



Fonte: Paradella, 2002.

Com o estudo da FLONA de Carajás, através do detalhamento pelo seu plano de manejo (BRASIL, 2016), possibilitou-se elaborar uma planilha com os tipos vegetacionais que ocupam a área (Tabela 3.1).

Tabela 3.1–Tipologias de cobertura encontradas na FLONA de Carajás.

<i>TIPOLOGIA</i>	<i>ÁREA NA FLONA (ha)</i>
Antrópico	4.504,49
Barragens	499,94
Lagoas	100,16
<i>Ambientes Florestais</i>	
Floresta Ombrófila (Densa e Aberta)	375.392,42
Floresta Estacional	4.931,47
Vegetação Rupestre Ferruginosa	10.349,02
Vegetação Rupestre de Outras Origens Rochosas	188,72
<i>TOTAL</i>	<i>395.966,22</i>

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

3.2.3. Solos

Conforme levantado no Plano de Manejo da FLONA Carajás (BRASIL, 2016), há uma intrínseca relação entre as classes de solos e o relevo, a vegetação e a geologia local. A partir do estudo da FLONA possibilitou-se uma melhor identificação dos solos na localidade, demonstrando também a existência de Cambissolos, onde anteriormente teríamos somente Latossolos.

Pelo estudo supracitado, houve a possibilidade da organização dos dados de solos e sua cobertura pela FLONA de Carajás, conforme podemos verificar na tabela 3.2 e na Figura 3.15 que seguem.

Tabela 3.2–Tipos de solos na FLONA de Carajás.

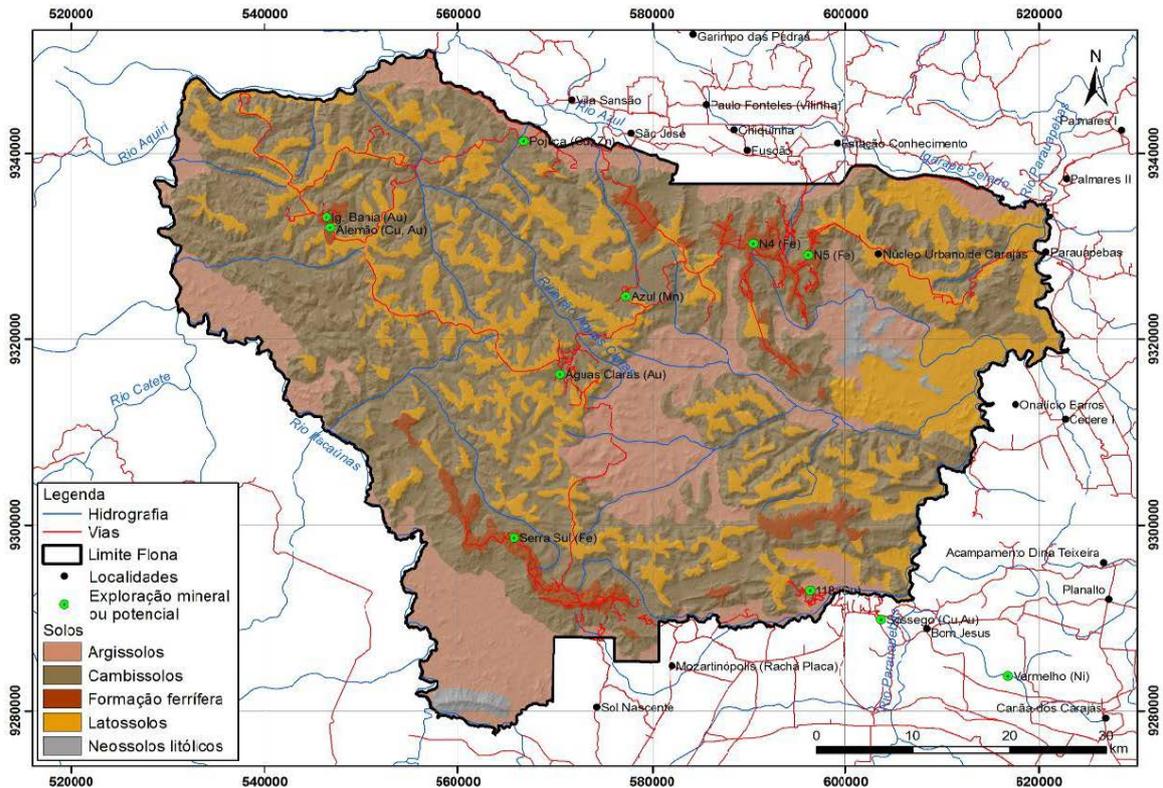
SOLOS	CÓDIGO	ÁREA (km²)
Cambissolos háplicos	CXbd	2.087,81
Latossolos Vermelho-Amarelos	LVAd	862,58
Argissolos Vermelho-Amarelos	PVAd	806,68
Plintossolos (Formação ferrífera)	TTff	154,13
Neossolos Litólicos	RLd	47,30
TOTAL		3.958,50

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

As combinações dos solos mapeados juntamente a padrões distintos da paisagem na localidade deram origem a 16 unidades de mapeamento distribuídas pelo espaço geográfico, que após serem somadas aos tipos de terreno, acabaram por totalizar 17 unidades.

O estudo da FLONA demonstrou a predominância dos Cambissolos, Latossolos, Argissolos e Neossolos Litólicos, estes os quais demonstram características distintas entre eles, traduzidos em diferentes condições de espessura, coesão e estabilidade (BRASIL, 2016).

Figura 3.15. Mapa de solos da FLONA de Carajás.



Fonte: Brasil (2016).

3.2.4. Geomorfologia

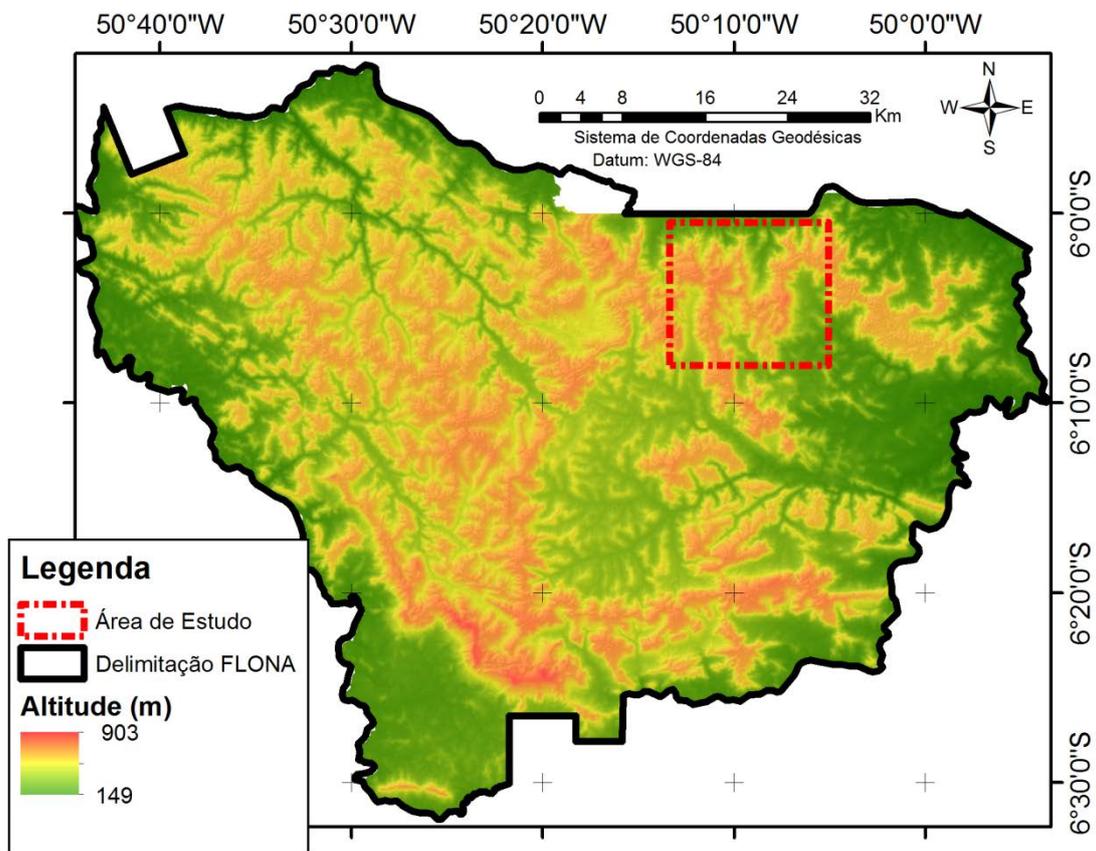
Elaborou-se a partir do Modelo Digital de Superfície (MDS) oriundo do projeto Topodata (BRASIL, 2008) o mapa hipsométrico da FLONA de Carajás, demonstrando uma variação de altitude entre 149 e 903 metros (Figura 3.16). Os estudos realizados para o plano de manejo da FLONA (BRASIL, 2016), possibilitaram a tabulação de faixas altimétricas no interior da UC, demonstrando em porcentagem a frequência de ocorrência da altitude na localidade (Tabela 3.3).

Tabela 3.3– Faixas altimétricas na FLONA de Carajás.

Faixa altimétrica (m)	Taxa de ocupação (%)		Faixa altimétrica (m)	Taxa de ocupação (%)
< 200	2,8		601 – 800	25,2
201 - 400	37,5		801 - 1000	0,2
401 - 600	34,3			

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

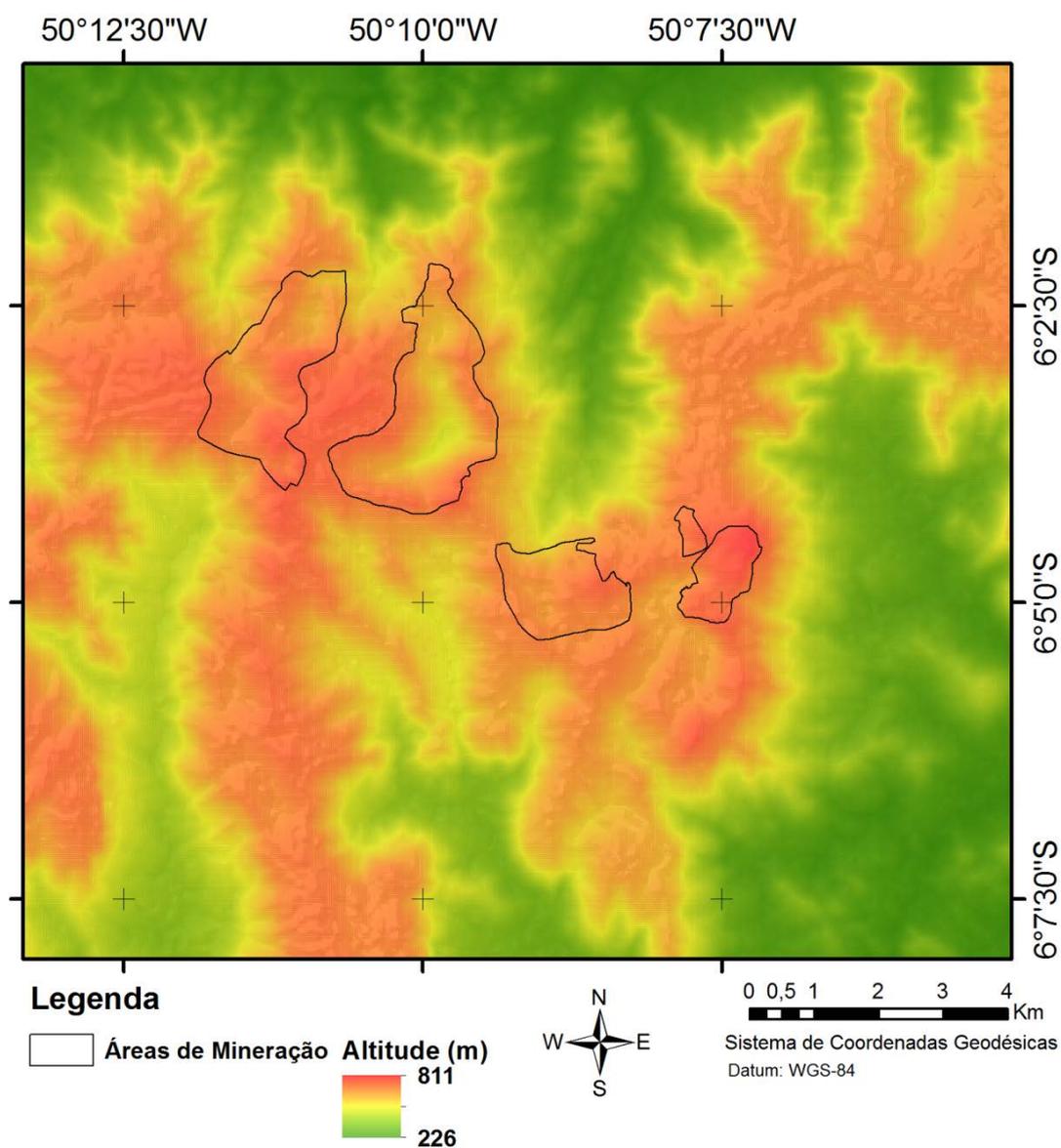
Figura 3.16. Hipsometria da FLONA Carajás.



Fonte: Produção do autor.

Detalhando a hipsometria para a área de estudo da pesquisa, observa-se que a variação de altitude passa a ser entre 226 a 811 metros (Figura 3.17), e que as áreas de mineração de ferro da Vale encontram-se relacionadas com áreas de maior altitude.

Figura 3.17. Hipsometria na área de estudo.



Fonte: Produção do autor.

Conforme os estudos do Plano de Manejo (BRASIL, 2016), possibilitou-se gerar uma classificação, fatiando em faixas de declividade e relacionando assim as altitudes que se encontram tais declives na área da FLONA, conforme podemos verificar na tabela abaixo (Tabela 3.4).

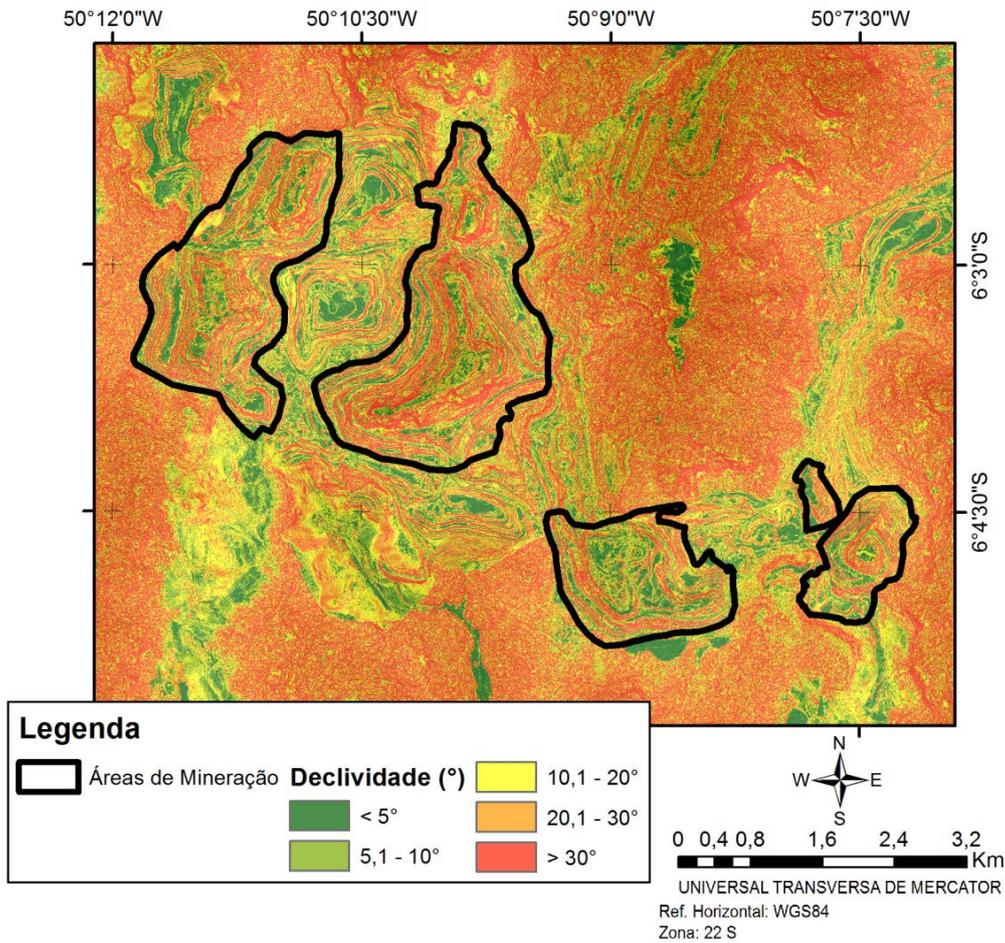
Tabela 3.4–Classificação por declividade na FLONA de Carajás.

<i>Classes de Declividade</i>	<i>Taxa de ocupação da área (%)</i>	<i>Altitude mínima (m)</i>	<i>Altitude máxima (m)</i>
< 5°	29,6	147,0	902,0
5,1 – 10°	22,5	150,0	901,0
10,1 – 20°	29,5	158,0	898,0
20,1 – 30°	14,9	181,0	886,0
> 30°	3,5	211,0	854,0

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

De posse do MDS gerado a partir do par estereoscópico da imagem GeoEye-1, conforme apresentado por Paradella e Cheng (2013), elaborou-se um mapa clinográfico para compreensão da influência da declividade na localidade, indicando valores de declividade mínimos de 1° e máximos de 56° (Figura 3.18).

Figura 3.18. Clinografia na área de estudo.

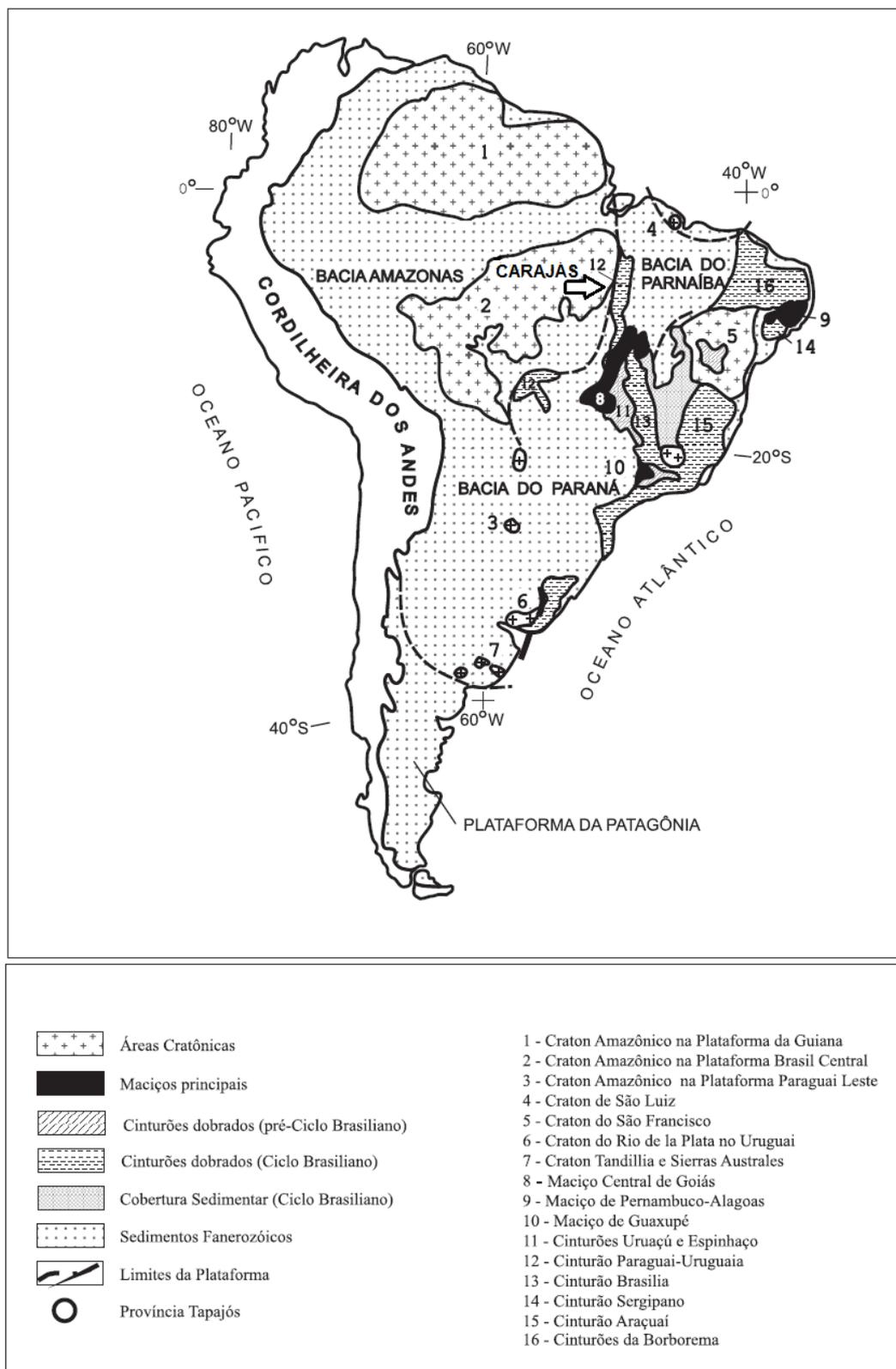


Fonte: Produção do autor.

3.3. Geologia regional

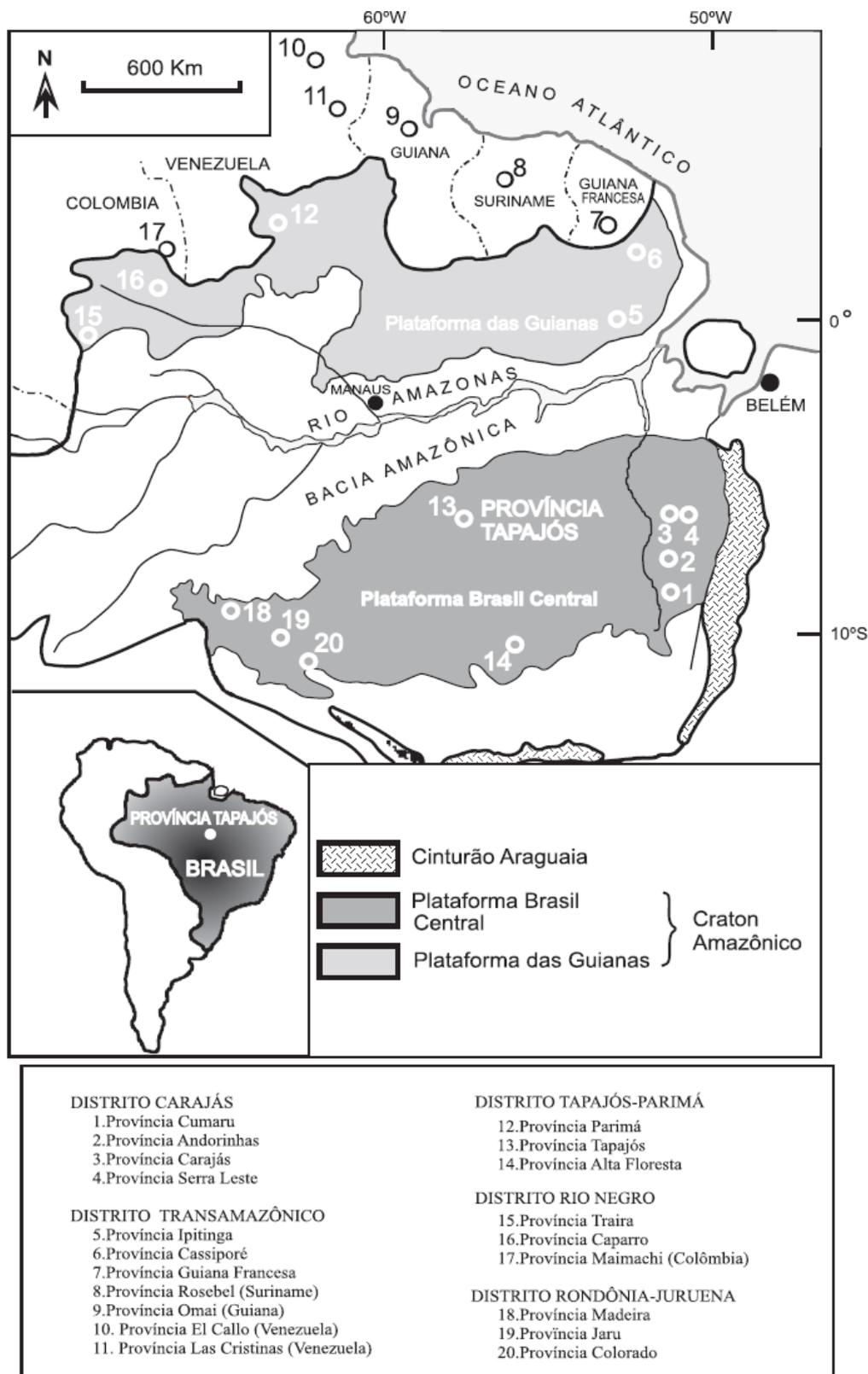
De acordo com Almeida e Hasui (1984), a Plataforma Sul-Americana se consolidou no final do Neoproterozóico e é composta por plataformas pré-Cambrianas e bacias sedimentares (Figura 3.19). A área de estudo se localiza no interior do Cráton Amazônico, que representa uma das maiores áreas cratônicas do mundo, estabilizada no final do Mesoproterozóico (ALMEIDA et al., 1967; CORDANI, 1988). Segundo Coutinho (2008), geograficamente, o Cráton Amazônico totaliza uma área de 4.500.000 km² e é dividido em dois blocos pela Bacia do Amazonas: Plataforma das Guianas e Plataforma Brasil-Central (Figura 3.20).

Figura 3.19. Plataforma Sul-Americana e principais domínios geotectônicos.



Fonte: Adaptado de Coutinho (2008).

Figura 3.20. Craton Amazônico e suas províncias minerais.



Fonte: Coutinho (2008).

A Província Mineral de Carajás (PMC) é considerada a maior e mais importante província mineral do país, além de ser uma das maiores do mundo (PEREIRA, 2009) e aloja vários depósitos minerais, dentre eles: ferro, ouro, cobre, níquel, zinco e manganês (PEREIRA, 2009).

A PMC está situada ao sudeste do Cráton Amazônico, nos terrenos arqueanos da Província Geocronológica Amazônia Central (TASSINARI e MACAMBIRA, 2004). A província em questão é dividida em dois domínios principais: Domínio Rio Maria ao sul e Domínio Carajás ao norte, separadas por zonas de cisalhamento com direção preferencial E-W (VASQUEZ et al., 2008). O Domínio Carajás apresenta como subdomínios tectônicos principais, os sistemas transcorrentes Carajás e Cuzco (HOLDSWORTH e PINHEIRO, 2000; VENEZIANI et al., 2004).

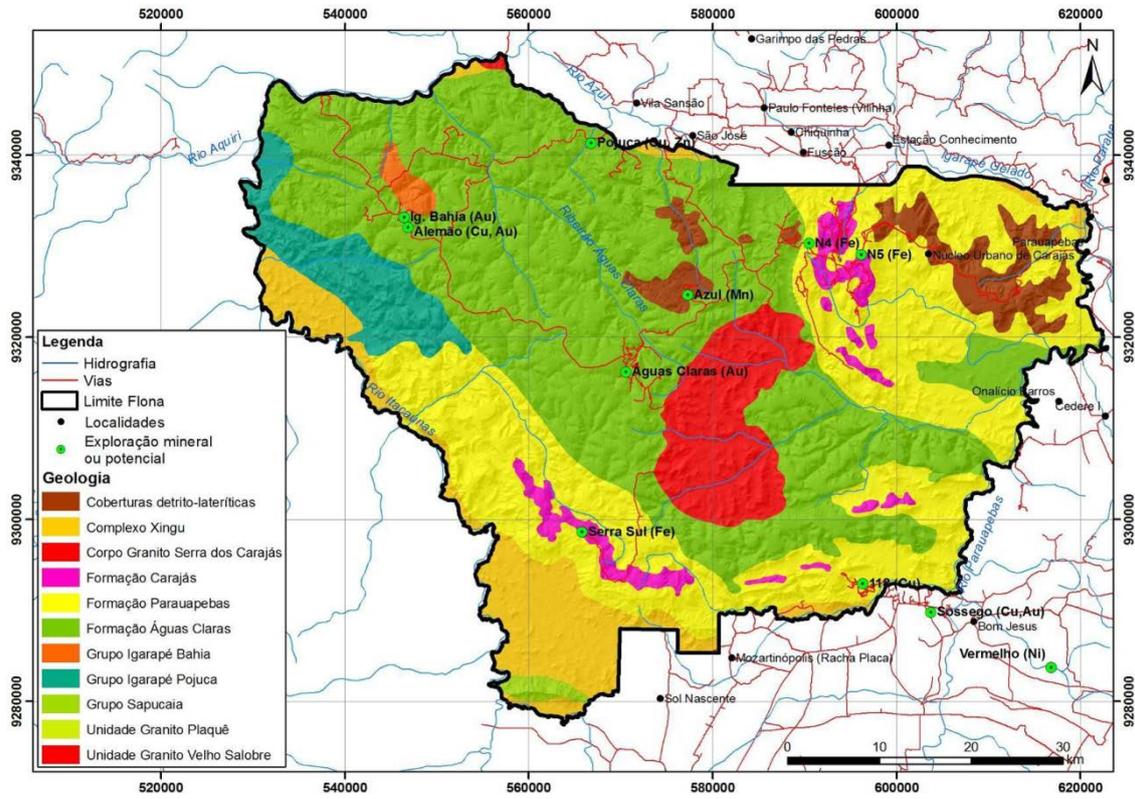
No interior da FLONA de Carajás, pelo levantamento realizado para o plano de manejo, pela empresa STCP Engenharia de Projetos, divulgado no relatório do Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás – Volume I - Diagnóstico (BRASIL, 2016), pode-se destacar 11 Formações Geológicas na Unidade de Conservação. De acordo com esse levantamento, a Formação predominante na FLONA é Águas Claras, a qual corresponde a 43,8% da área total da UC. Abaixo seguem as formações geológicas encontrados na área (Tabela 3.5 e Figura 3.21).

Tabela 3.5–Geologia na FLONA de Carajás.

Formações Geológicas	Km²	%
Formação Águas Claras	1.735,00	43,8
Formação Parauapebas	1.115,70	28,2
Formação Carajás	111,50	2,8
Coberturas detrito-lateríticas	169,90	4,3
Outras Formações	826,20	20,9

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

Figura 3.21. Mapa das formações geológicas da FLONA de Carajás.



Fonte: Brasil (2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Para a presente pesquisa, serão utilizados os seguintes materiais:

- 33 cenas TerraSAR-X no formato *Single Look Complex* (SLC) adquiridas em órbita ascendente, modo *StripMap* e polarização HH, no período entre 20 de março de 2012 à 07 de abril de 2013, com um intervalo de ângulo de incidência de 39° a 42°. A resolução das cenas em azimute equivale à 3,30 m e em alcance à 1,90 m;
- MDS preciso com acurácia vertical de 1,50 m de RMSE, gerado no software PCI *Geomatics* (versão 2013) a partir de um par estéreo de imagens pancromáticas do satélite GeoEye-1 adquiridas em 01 de julho de 2012 (PARADELLA e CHENG, 2013);
- Software GAMMA – *Remote Sensing* (WERNER et al., 2000), módulos IPTA, ISP, DIFF/GEO e DISP para o processamento interferométrico;
- Software ArcGIS 10.2 (ESRI) para a confecção dos layouts dos mapas de deformação;
- Software Statistica v.08 para teste e validação estatística de Wilcoxon;
- Imagens ortorretificadas GeoEye-1 pancromática e multiespectral da área de estudo com resolução espacial de 0,50 metros e 2,00 metros respectivamente. O processamento de ortorretificação foi executado no módulo *OrthoEngine*, disponível no software PCI *Geomatics* (versão 2013);
- Dados de pluviometria da Estação de Carajás do período entre março de 2012 e abril de 2013 fornecidos pela Vale S.A.;

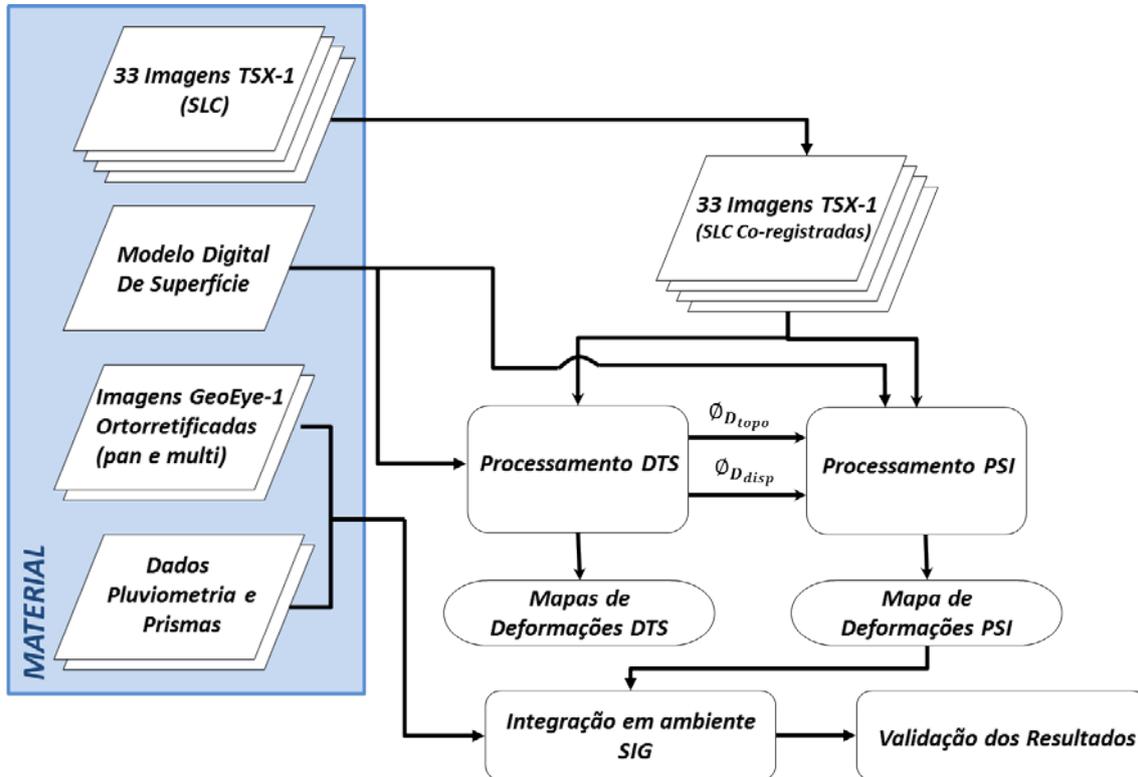
- Dados de prismas fornecidos pela Vale S.A. para a validação dos resultados de deformação (LoS) do período seco.

4.2. Métodos

A metodologia em que se baseia o presente estudo fundamenta-se na integração das técnicas DTS e PSI, para que seja possível o recobrimento de uma área extensa, de forma a superar a limitação da técnica PSI (implementada na metodologia IPTA do *software Gamma*) na qual somente é possível analisar pequenas áreas em extensão, devido fundamentalmente a variação da fase atmosférica em grandes áreas, aumentando a influência desta fase sobre os PS à medida que estes se afastam do ponto de referência selecionado.

Para melhor compreensão do processo que foi empregado neste trabalho, criou-se um diagrama completo do fluxo de processamento adotado (Figura 4.22), desde a entrada do material até a validação dos resultados obtidos com a junção das técnicas A-DInSAR.

Figura 4.22. Fluxograma geral do trabalho.



Fonte: Produção do autor.

4.2.1. Preparação dos dados

Com a entrada do material para o processamento, foi necessária a conversão dos dados brutos em formato *Single Look Complex* (SLC) para o formato de leitura de imagens do software Gamma, bem como o co-registro da pilha de imagens.

4.2.2. Processamento A-DInSAR

A metodologia desenvolvida por Mura et al. (2016), consiste na combinação das duas técnicas mencionadas, para que seja possível a determinação de taxas de deformações lineares e não-lineares em resolução espacial plena e em larga extensão de terreno.

Nesta abordagem utiliza-se os resultados da DTS, ou seja, a correção topográfica do terreno e o modelo de deformação superficial, como solução inicial para a análise PSI, melhorando assim a determinação da deformação remanescente e do erro topográfico em resolução integral (MURA et al., 2016). A Figura 4.23 ilustra detalhadamente em diagrama o fluxo de processamento utilizando as técnicas DInSAR-TS e PSI em conjunto.

Inicialmente é formada a pilha de DInSAR multi-referenciados e filtrados com a técnica de *multi-look* (a partir das imagens SLC – *Single Look Complex*), posteriormente é realizada a operação de desdobramento de fase de todos os interferogramas. Nesta etapa são geradas as imagens de coerência interferométrica que mede o grau de correlação dos pares interferométricos, que servirão para selecionar os melhores pares para a aplicação da técnica DInSAR-TS.

Os interferogramas desdobrados são então processados com a técnica DInSAR-TS para a obtenção das taxas de deformação linear de cada pixel, a deformação não linear e também o erro do modelo de elevação utilizado. Os resultados da DTS, ϕ_{Mrate} (taxa de deformação linear), ϕ_{Dtopo} (erro do modelo de elevação) e ϕ_{Ddisp} (deformação não linear) são interpolados para atingir a plena resolução das imagens SLC.

4.2.3. Integração de dados em ambiente SIG

Para a análise dos resultados obtidos com a técnica, realizou-se a integração destes num ambiente SIG, para este caso o software ArcGIS 10.2. Integrou-se os dados referentes aos PSI oriundos da técnica, as imagens GeoEye-1 multiespectral e pancromática, assim como o posicionamento/medidas dos prismas de campo.

Com isso foi possível realizar o cruzamento das bases de forma a checar a acurácia dos resultados da técnica, verificando as medições realizadas em campo (prismas) nas proximidades dos PS espacializados da técnica. Com isso também possibilitou-se fomentar discussões perante o posicionamento dos PS frente as imagens GeoEye-1.

4.2.4. Validação dos resultados

4.2.4.1. Validação através de prismas

A validação dos resultados obtidos foi realizada através de levantamento topográfico de alguns taludes com estação total e prismas, cujos dados foram disponibilizados pela Vale S.A.. Para permitir comparar os dados de medição obtidos da leitura dos prismas verticais, estes foram convertidos para a linha de visada do satélite (LoS) TSX-1, através da multiplicação das medidas dos prismas pelo coseno do ângulo de incidência ($\theta \approx 41^\circ$), dada pela Equação 7.

$$P_{LoS} = P_x \times \cos \theta \quad (7)$$

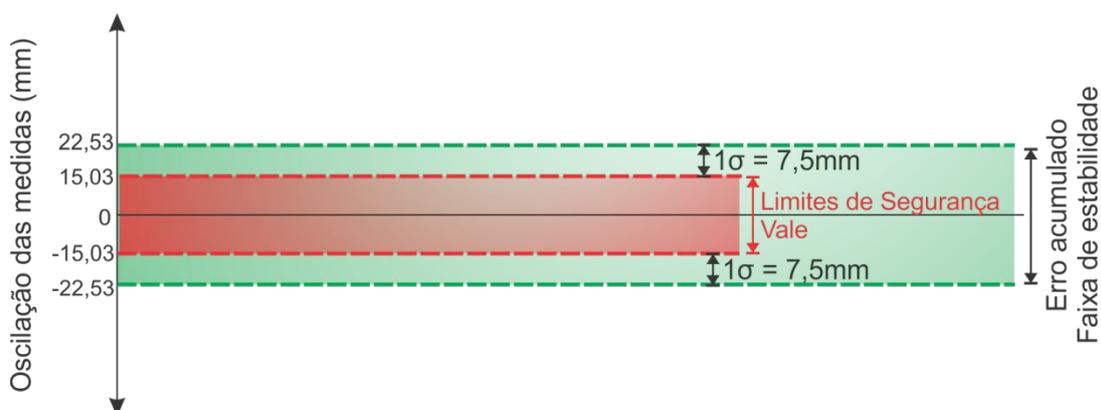
sendo P_{LoS} a medida do prisma na linha de visada do satélite (LoS), P_x a medida de campo do prisma, e θ o ângulo de incidência do satélite na localidade.

Para que houvesse concordância dos dados a serem analisados das mensurações entre prismas de campo e medidas obtidas com a técnica PSI, somente foram selecionados os pontos PS próximos aos prismas de validação.

Fez-se necessário a conversão dos limites de segurança definidos pela equipe da Vale S.A. para LoS, onde obteve-se que a deformação máxima aceitável varia entre -15,03 mm a 15,03 mm.

Entretanto, devido as medidas dos PSI não serem absolutas, ou seja, sofrem uma flutuação nos resultados finais, originados após o desdobramento da fase, caracterizado este pelo desvio padrão de 1σ (valor médio dos desvios encontrados na área), o qual para o caso foi adotado 7,5 mm (ver a distribuição de erros na Figura 5.35). Assim fez-se necessário agregar os valores estabelecidos pela Vale somando-o ao valor médio do desvio padrão das taxas de deslocamento superficiais. A Figura 4.24 apresenta de forma gráfica os valores do limiar de segurança utilizados na análise.

Figura 4.24. Limites de segurança para definição de estabilidade.



Fonte: Produção do autor.

Também para que fosse possível a correlação com precisão em datas e medidas dos prismas com os PS, realizou-se a interpolação dos dados de prismas, de forma que as duas bases estivessem no mesmo intervalo de tempo.

4.2.4.2. Validação pelas classes geomecânicas

Explorou-se também a correlação entre as classes geomecânicas e as deformações obtidas pela técnica PSI+DTS. As classes geomecânicas são classificações de atributos do terreno utilizados na geologia de engenharia para fins operacionais da mineração, de maneira a indicar áreas mais estáveis geomecanicamente (classes boa e muito boa) e mais instáveis (classes ruim e muito ruim). As classificações geomecânicas disponibilizadas pela empresa Vale, restringem-se somente a cobertura das áreas de mineração, abrangendo as minas N4E, N4W, N5E e N5W (Figura 4.25).

Para melhor compreensão das discussões foi utilizada a classificação geomecânica adotada pela equipe da Vale (BVP ENGENHARIA, 2011). Os parâmetros são os estabelecidos pelo sistema internacional RMR (*Rock Mass Rating*), que é a soma dos parâmetros classificados em campo adaptado pela empresa. Para esta classificação, tomaram-se diferentes pesos para os atributos de amostras em campo vinculados à estabilidade do maciço (Grau de fraturamento, grau de alteração, grau de consistência, etc.). Neste sistema classificatório, quanto maior for seu peso, maior será a contribuição deste parâmetro no controle de estabilidade do maciço. Na Tabela 4.6 podemos verificar as classes geomecânicas para as minas do Complexo. Na Tabela 4.7 estão relacionados os litotipos à qualidade geomecânica aplicada a localidade.

Tabela 4.6—Classes Geomecânicas para os maciços da Vale, segundo RMR.

Valores de RMR	Classe Geomecânica	Descrição
100 – 81	I	Excelente
80 - 61	II	Muito Bom
60 – 41	III	Bom
40 – 21	IV	Ruim
< 20	V	Muito Ruim

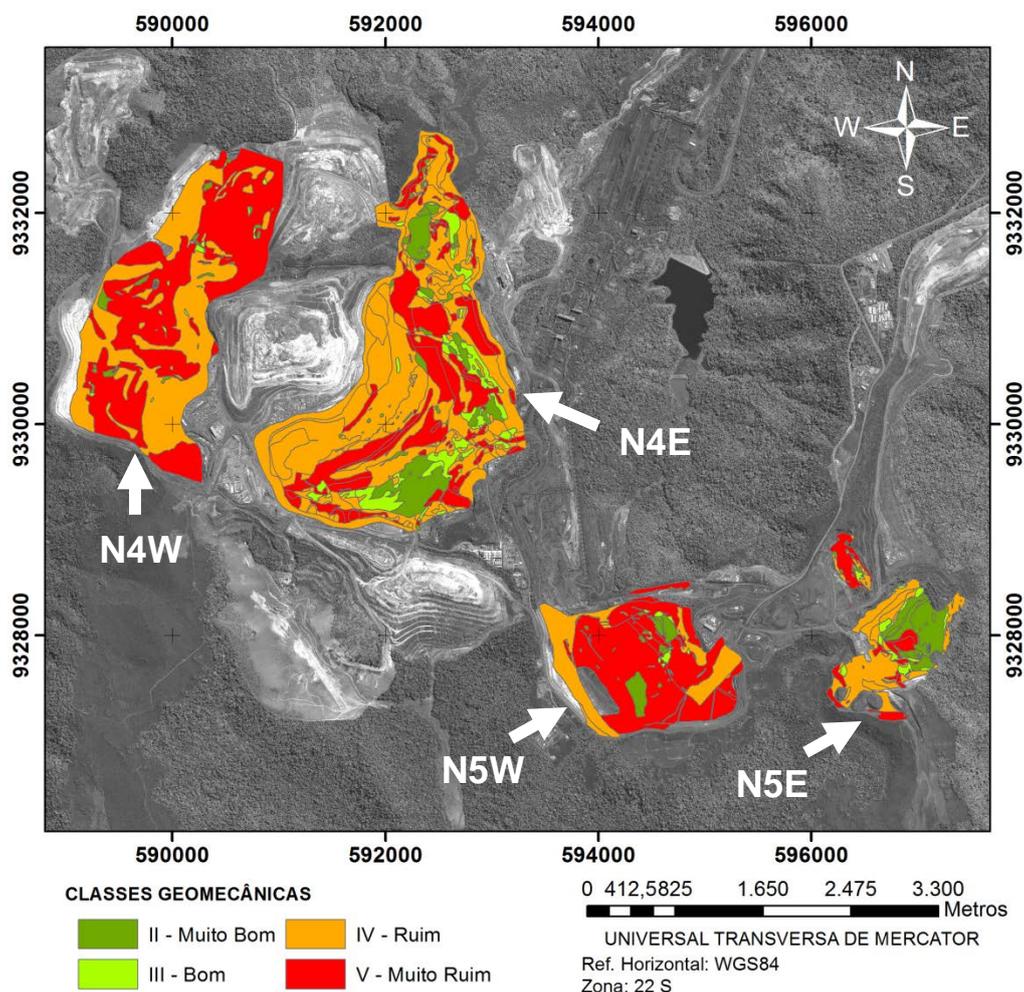
Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

Tabela 4.7–Relação dos litotipos mapeados com à qualidade geomecânica no Complexo.

Litotipo	Descrição do litotipo	Classe Geomecânica
Hematita Dura (HD)	Apresenta baixo grau de alteração, consistência dura e com grau de fraturamento moderado.	II – Muito Bom
Hematita Macia ou Friável (HM)	Apresenta alto grau de alteração, grau de consistência macio e grau de fraturamento elevado.	V – Muito Ruim IV - Ruim
Minério de Baixo Teor (MBT)	Apresenta alto grau de alteração, consistência macia e grau de fraturamento muito pobre.	V – Muito Ruim
Jaspilito (JP)	Apresenta grau de alteração baixo, grau de consistência elevada e o grau de fraturamento concentra-se entre muito a moderadamente moderado.	II – Muito Bom III - Bom
Máfica Sã (MS)	Apresenta grau de alteração incipiente, grau de consistência dura e com grau de fraturamento alto.	II – Muito Bom
Máfica Semi-Decomposta (MSD)	Apresenta grau de alteração entre leve e alto, grau de consistência médio e com grau de fraturamento entre moderado a muito fraturado.	III - Bom
Máfica Decomposta (MD)	Apresenta alto grau de alteração, baixo grau de consistência.	V – Muito Ruim IV - Ruim

Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

Figura 4.25. Mapa de Classes Geomecânicas para o Complexo.



Fonte: Produção do autor.

Com o objetivo de verificar a porcentagem de PS em cada mina, para todas as classes geomecânica, utilizaram-se os parâmetros de controle de estabilidade de maciços definidos pela Vale, com uma variação de segurança de 20,00 mm a -20,00 mm na vertical, nas leituras realizadas através de técnicas de topografia em campo (leitura de prismas com estação total). Este limite de segurança foi recalculado para se ter a mesma magnitude das medidas realizadas pela técnica PSI pontual, a qual é mensurada em LoS (*Line of Sight*), passando então a variar entre 15,03 mm a -15,03 mm, que somados ao desvio padrão médio, conforme discutido anteriormente (Figura 4.24), passou-se a variar entre 22,53 mm a -22,53 mm. Para a discussão e validação dos

resultados aqui contidos, elaborou-se uma classificação de deformações conforme a medida realizada em cada PS, como definido a seguir:

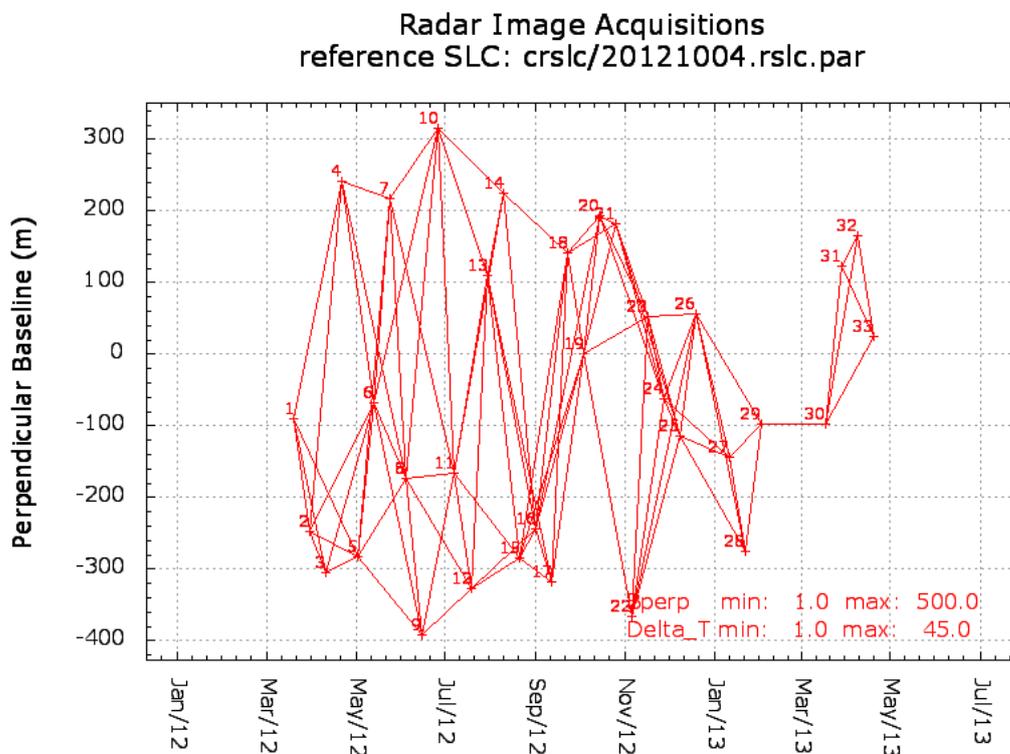
- Subsidência: pontos $< -22,53$ mm;
- Estável: pontos contidos entre $-22,53$ mm e $22,53$ mm;
- Soerguimento: pontos $> 22,53$ mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise dos resultados

Planejou-se ter uma imagem a cada 11 dias (revisita programada do sistema TSX-1), mas por duas vezes houve interrupção de imageamento, criando descontinuidades de 22 e 44 dias. Para cobrir o intervalo de tempo das aquisições, simulou-se os pares interferométricos diferenciais para um intervalo de tempo de até 45 dias e uma linha de base perpendicular máxima até 400 metros, como mostrado na Figura 5.26, onde cada conexão do gráfico representa um interferograma. A inspeção visual foi usada para descartar interferogramas com comprometimento no processo de desdobramento da fase (erros oriundos do processo). A maioria dos pares selecionados pertence ao intervalo de tempo mais curto entre as aquisições (11 dias).

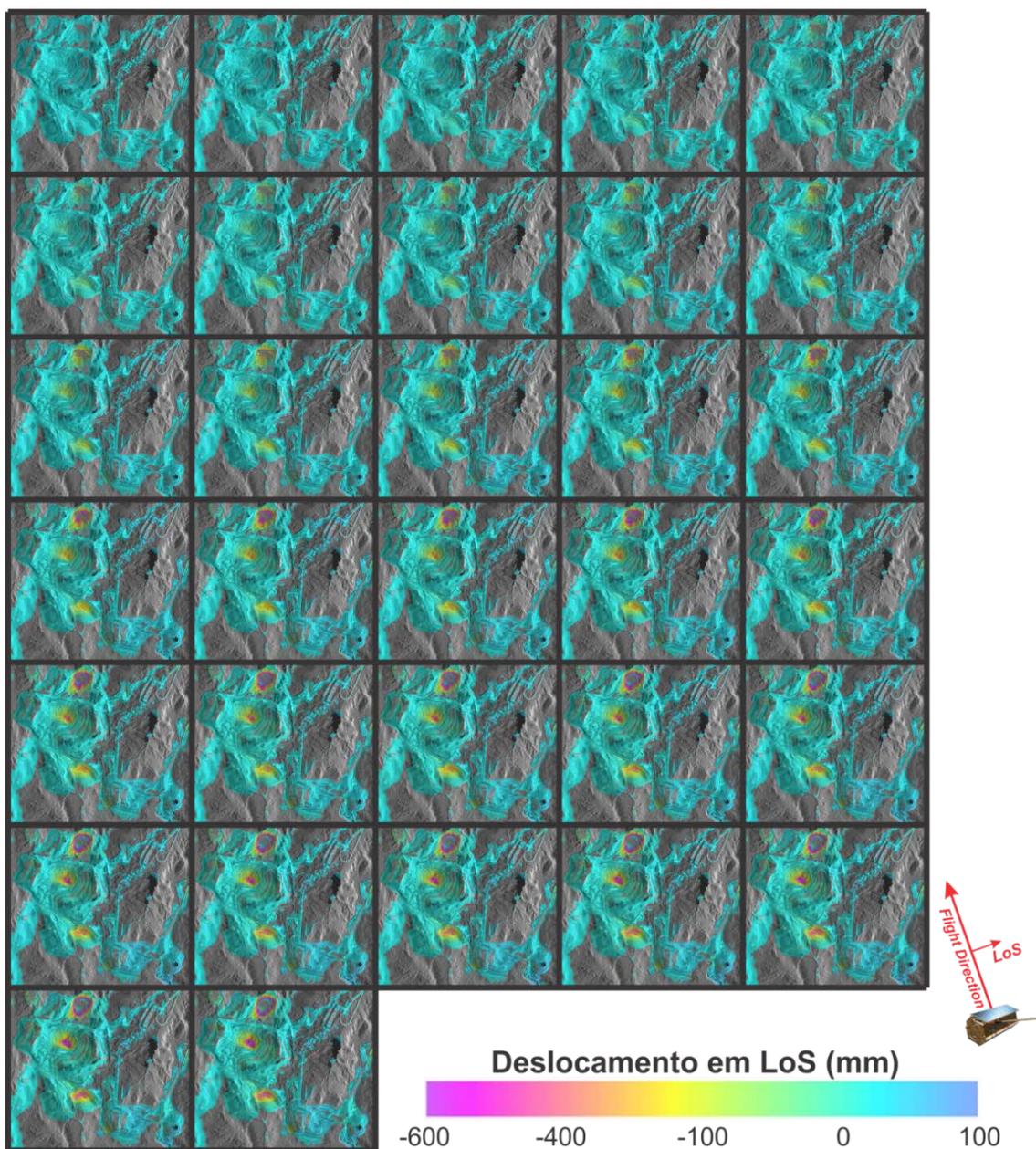
Figura 5.26. Pares interferométricos selecionados com base na pilha de 33 imagens TSX-1.



Fonte: Produção do autor.

A solução do sistema equações (4), através do método SVD, correspondente ao conjunto de interferogramas utilizados, fornece a evolução da detecção dos deslocamentos superficiais par a par no Complexo Minerador, como ilustrado na Fig. 5.27, evidenciando as áreas estáveis (coloração em azul) e instáveis (coloração indo do amarelo para o roxo).

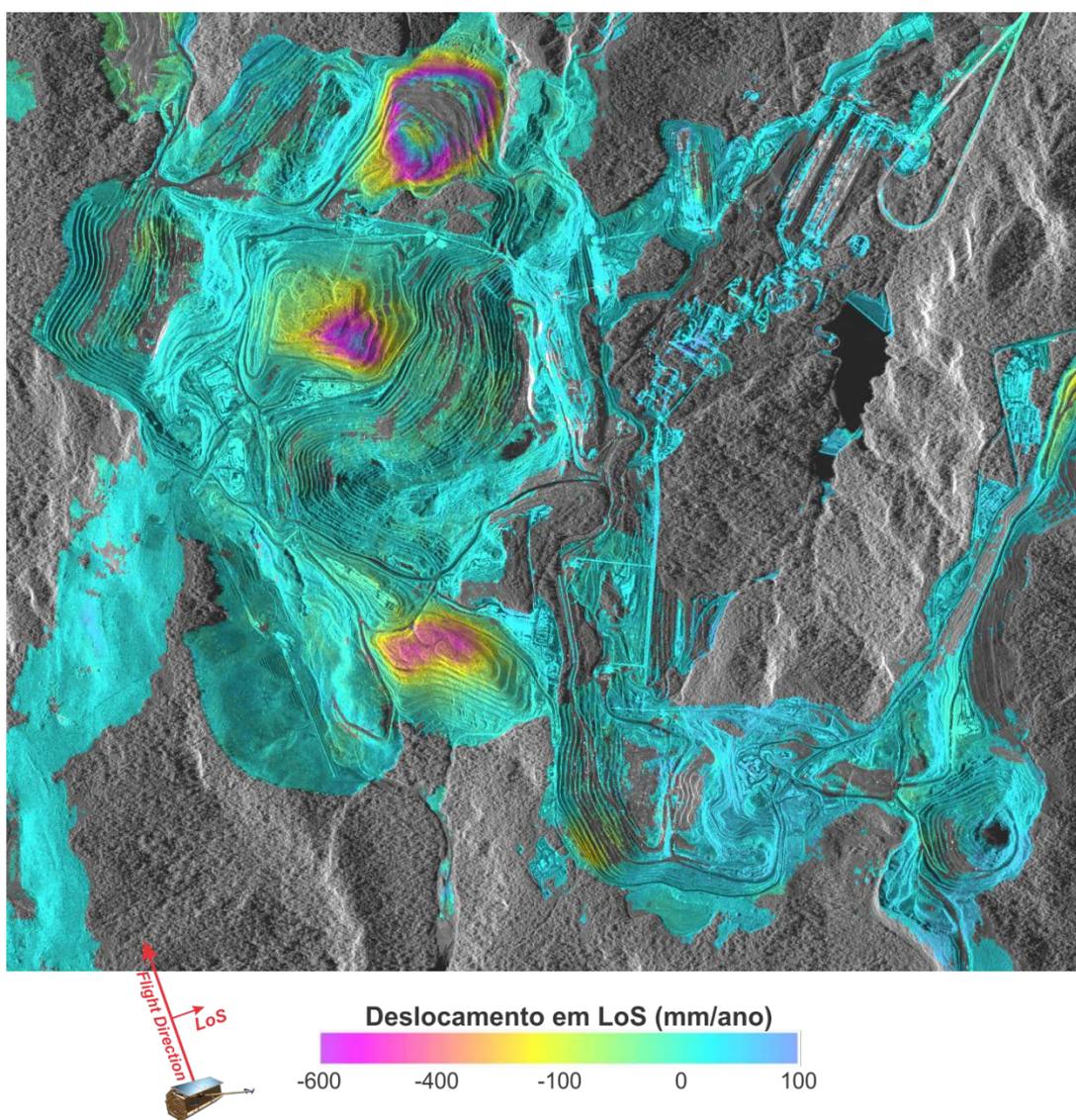
Figura 5.27. Mapas com a evolução dos deslocamentos superficiais com a técnica DInSAR-TS para o Complexo Minerador de Carajás.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.28 ilustra o resultado acumulado dos deslocamentos superficiais obtidos através da técnica DInSAR-TS, utilizando-se as 33 imagens co-registradas no período de 20/03/2012 a 20/04/2013. Como será visto adiante, nas discussões, as áreas de maior deslocamento estão sob as Pilhas de Deposição de Estéril e setor da cava da mina N5W.

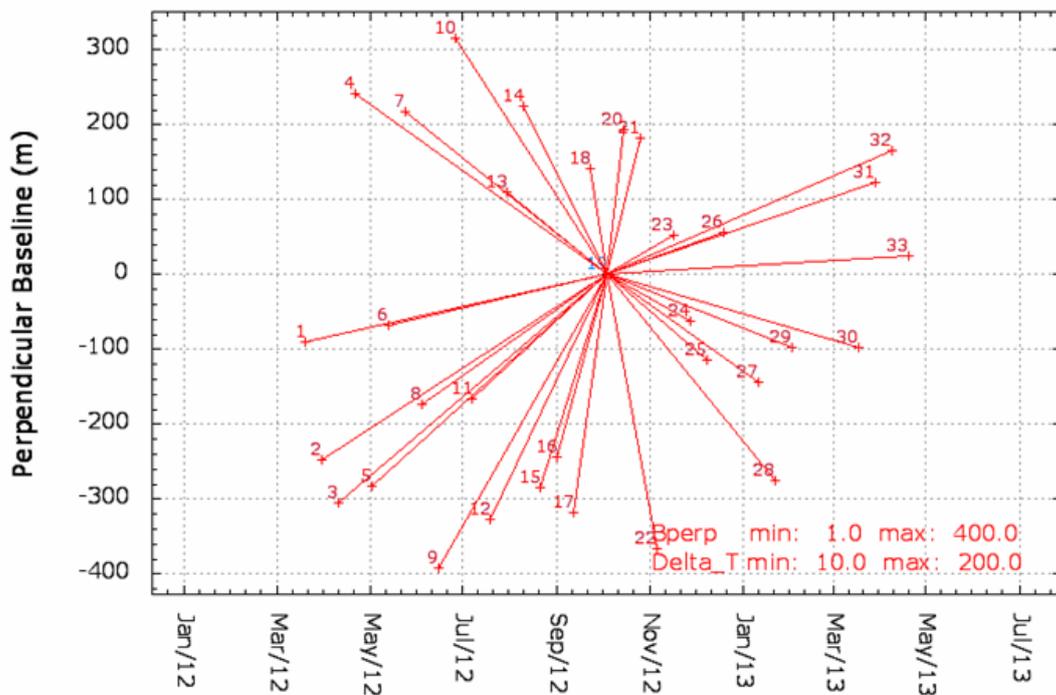
Figura 5.28. Mapa de deslocamento superficial acumulado oriundo da técnica DInSAR-TS para o Complexo Minerador de Carajás.



Fonte: Produção do autor.

Para a análise PSI, foi utilizada uma pilha de 33 imagens SLC co-registradas para gerar os pares interferométricos em relação a uma imagem mestre (Tabela 5.8), cuja seleção foi feita com base na menor dispersão de linha de base perpendicular e próximo ao centro da série temporal, como mostrado na Figura 5.29. Os candidatos de PS foram estimados com base no índice de dispersão de amplitude e baixa diversidade espectral em cada pixel da pilha das imagens co-registradas.

Figura 5.29. Pares interferométricos selecionados com base na imagem mestre (04 de outubro de 2012).



Fonte: Produção do autor.

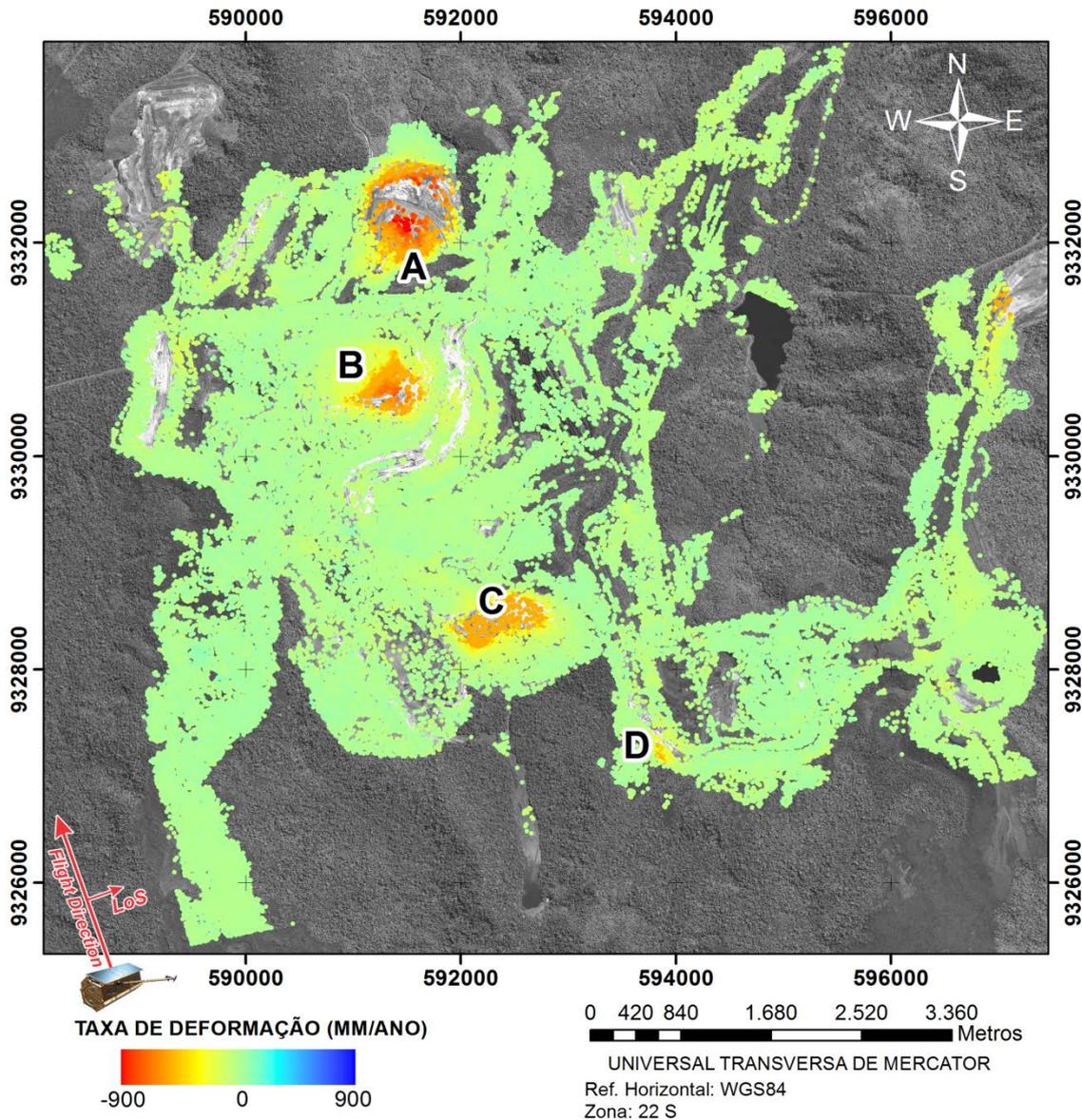
Tabela 5.8–Data das aquisições das imagens, linha de base perpendicular (m) e intervalo relativo de tempo para a imagem mestre (04/10/2012).

Par	Datas	Bperp (m)	Dias	Par	Datas	Bperp (m)	Dias
1	20/03/2012	-90,29	-199	18	23/09/2012	141,48	-11
2	31/03/2012	-247,08	-187	19	04/10/2012	-	0
3	11/04/2012	-304,35	-176	20	15/10/2012	193,19	11
4	22/04/2012	240,80	-165	21	26/10/2012	182,55	22
5	03/05/2012	-282,70	-154	22	06/11/2012	-365,24	33
6	14/05/2012	-67,05	-143	23	17/11/2012	52,94	44
7	25/05/2012	-132,00	-132	24	28/11/2012	-62,38	55
8	05/06/2012	-172,43	-121	25	09/12/2012	-114,12	66
9	16/06/2012	-391,40	-110	26	20/12/2012	55,93	77
10	27/06/2012	315,25	-99	27	11/01/2013	-143,35	99
11	08/07/2012	-165,18	-88	28	22/01/2013	-275,16	110
12	19/07/2012	-326,51	-77	29	02/02/2013	-97,73	121
13	30/07/2012	110,54	-66	30	18/03/2013	-96,69	165
14	10/08/2012	224,56	-55	31	29/03/2013	123,33	176
15	21/08/2012	-284,61	-44	32	09/04/2013	165,84	187
16	01/09/2012	-242,91	-33	33	20/04/2013	25,34	198
17	12/09/2012	-317,49	-22				

Fonte: Produção do autor.

O resultado do processamento PSI, obtido com a metodologia proposta, utilizando-se 33 imagens no período entre março de 2012 a abril de 2013, é apresentado através de um mapa de deslocamento de superfície do solo na área total do Complexo Minerador de Carajás, (Figura 5.30).

Figura 5.30. Mapa de deslocamentos superficiais expresso em velocidade média de deformação em LoS para o Complexo Minerador de Carajás.



Fonte: Produção do autor.

Para melhor discussão, pontuou-se na Figura 5.30, quatro pontos essenciais ao desenvolvimento das discussões a cerca das movimentações, a Pilha de Estéril NWI (A), a Pilha de Estéril W (B), a Pilha de Estéril S IV (C) e os taludes de mineração da mina N5W (D).

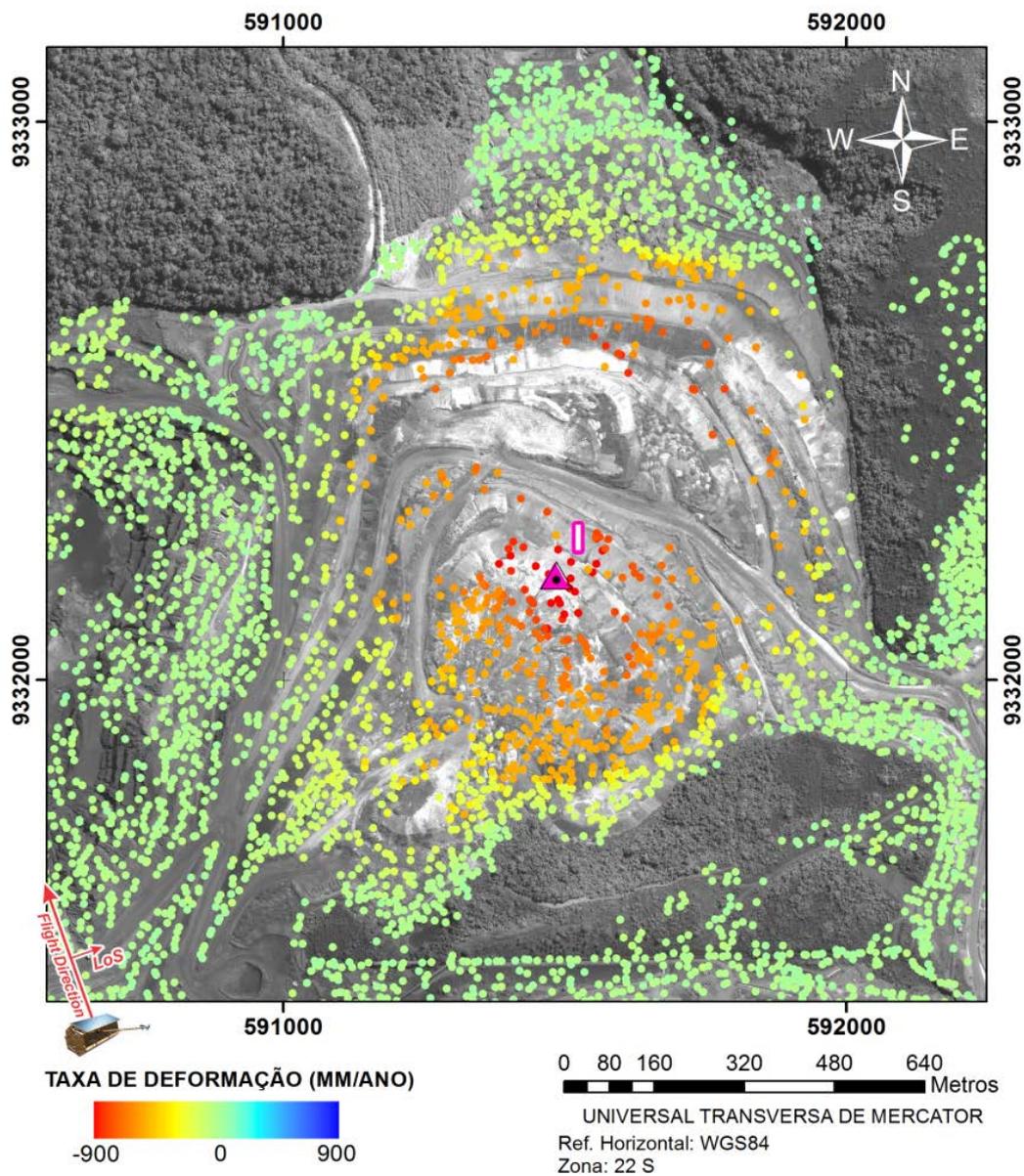
Nota-se na Figura 5.30 que não houve nenhuma movimentação relevante em áreas fora dos limites das pilhas de estéril (demarcações A, B e C), com exceção da deformação encontrada em setor da cava da mina N5W (demarcação D).

Tomando como exemplo a Pilha de Estéril NW I (PDE NWI, detalhe A na Figura 5.30), encontrou-se alta taxa de deformação, com valores negativos em LoS, mostrando um afastamento em relação ao satélite (subsistência), atingindo valores de até -843,00 mm/ano em LoS (Figura 5.31, ponto I).

A Figura 5.32, mostra deslocamento em LoS do ponto I com o tempo. O deslocamento na área pode ser explicado essencialmente pelos recalques ocasionados durante e após a operação da pilha (VICTORINO, 2016), valores de assentamentos considerados normais para estes tipos de estruturas de mineração. O mesmo pode ser explicado para as áreas demarcadas com B e C na Figura 5.30, de deslocamento superficial de até -666,00 mm/ano para o setor B e de até -454,00 mm/ano para o setor C.

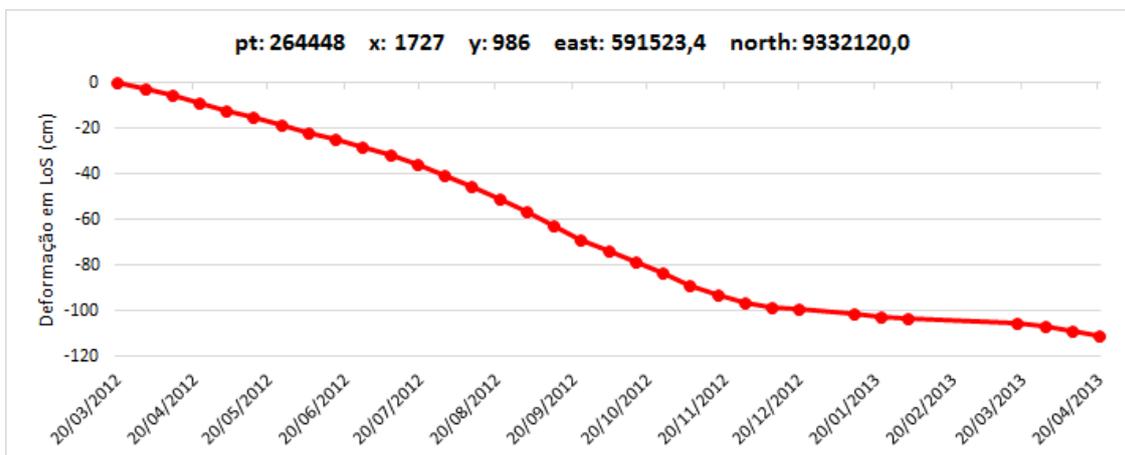
Posteriormente serão verificados os resultados obtidos neste item, correlacionando-os resultados com medições realizadas por estações totais e prismas em campo.

Figura 5.31. Mapa de deslocamento superficial expresso em velocidade média em LoS para a Pilha de Estéril NWI.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.32. Deslocamento em LoS do ponto I (Figura 5.29).



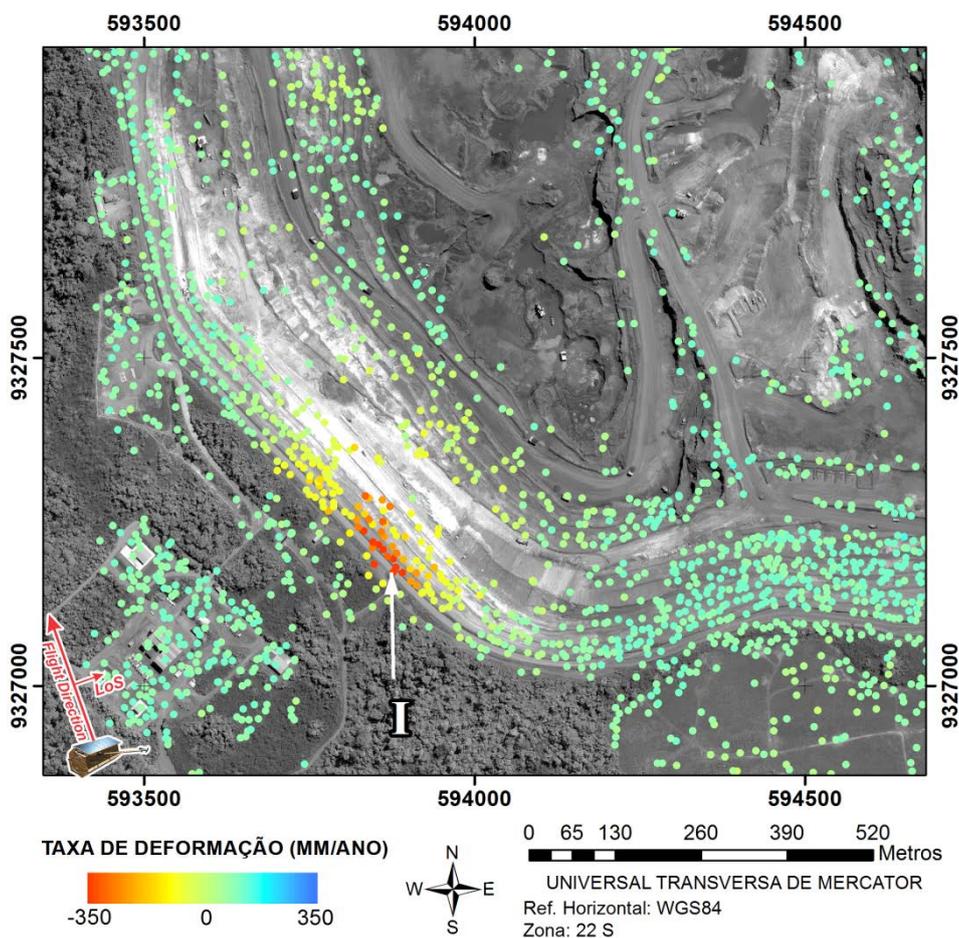
Fonte: Produção do autor.

Nota-se na Figura 5.32 o comportamento não linear do deslocamento superficial na Pilha de Estéril NW I, associado a uma alta taxa de subsidência de -843,00 mm/ano. A obtenção de informação não linear para a deformação bem com a possibilidade de monitorar alta taxa de de formação, utilizando a técnica PSI, foi possível graças a combinação das duas técnicas mostrada no diagrama da Figura 4.23.

Na mina N5W (demarcação D na Figura 5.30), foi detectado um afastamento em relação ao satélite de até -340 mm/ano, ao longo das bancadas e rampa da estrada no setor SW da mina N5W (Figura 5.33, ponto I), associado a evidências de deslocamento superficial, fraturas em paredes das bancadas, fissuras de tensão em bermas, conforme visto por Mura et al. (2016).

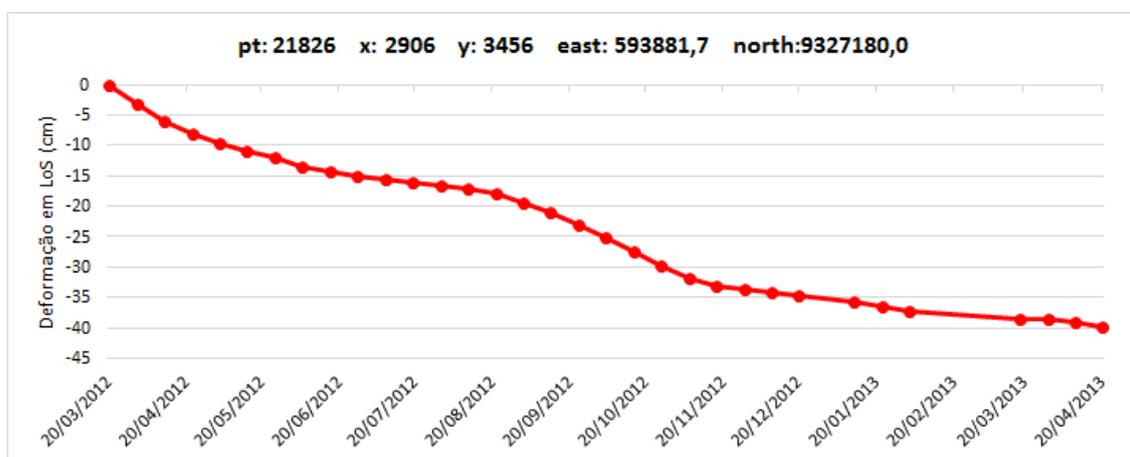
A instabilidade pode ser associada a um controle estrutural dado pela zona de cisalhamento de tendência NW-SE e sistema de falhas com tendência EW, mapeado pela BVP sob contrato da Vale (BVP Engenharia, 2011). O deslocamento superficial do ponto I da Figura 5.33 é ilustrado na Figura 5.34. Nota-se também um comportamento não linear da deformação nas bancadas deste setor da cava.

Figura 5.33. Mapa de deslocamento superficial expresso em velocidade média em LoS para as bancadas do setor SW da Mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.34. Deslocamento em LoS do ponto I (Figura 5.31).



Fonte: Produção do autor.

As medidas de deformação dos PS apontados na Figura 5.30, foram obtidos em relação a um ponto de referência, selecionado dentro da área de interesse do estudo e assumido como estável, além deste ser referenciado à data de aquisição da primeira cena. Portanto, os dados de deslocamentos fornecidos para cada PS são dados relativos e não absolutos.

A precisão destas medições podem ser estimadas através da dispersão dos valores de PS em relação ao ponto de referência, expressa pelo desvio padrão da taxa de deslocamento (Figura 5.35), representada de acordo com Gamma (2013) pelas equações 8 e 9 que seguem.

$$\sigma_{Vd(x,r)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\lambda}{\Delta t_i 4\pi} \phi_{PS_disp(i)} - \frac{\lambda}{4\pi} \phi_{PS_rate} \Delta t_i \right)^2} / \Delta t_i^2 \quad (8)$$

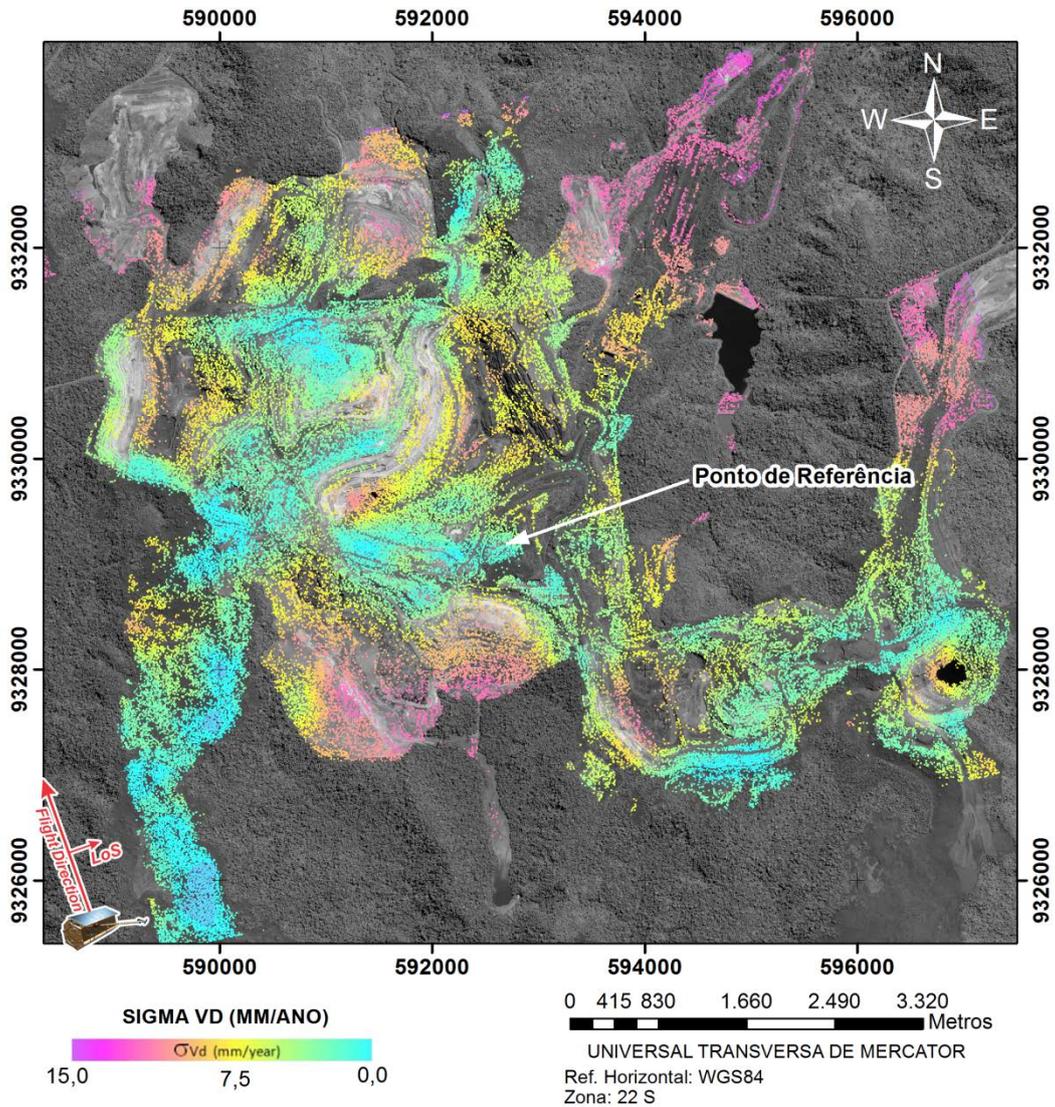
onde:

$$\phi_{PS_rate} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i \phi_{PS_disp(i)}}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i^2} \quad (9)$$

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

Como pode-se verificar na Figura 5.35, a maior parte da área de estudo apresenta um desvio padrão próximo a 0 mm/ano. Os erros ocasionados pelo desvio padrão nos resultados finais são muito baixos quando consideramos o período de um ano, fomentando assim uma acurácia elevada dos resultados.

Figura 5.35. Mapa do desvio padrão das taxas médias de deslocamento superficiais.

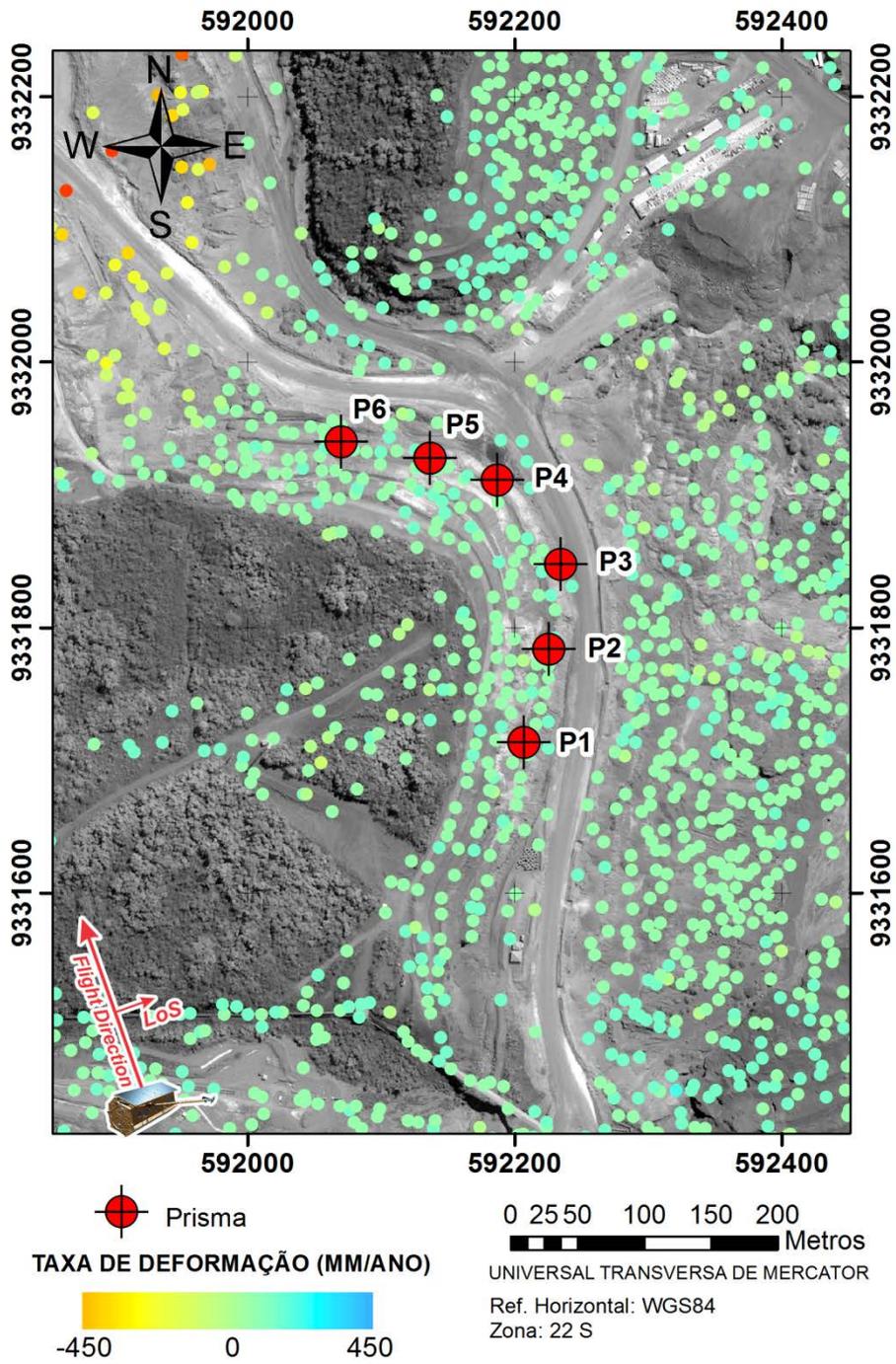


Fonte: Produção do autor.

5.2. Validação dos resultados

Duas áreas foram utilizadas para validação dos resultados, a primeira caracterizada por uma região estável, localizada nas proximidades do flanco norte da mina N4E, na área da PDE W. Na Figura 5.36 pode-se verificar o posicionamento dos prismas, bem como as deformações do entorno da área de verificação. Uma segunda área de validação esta localizada nos taludes da mina N5W, onde foram utilizados 3 prismas, como mostra a Figura 5.39.

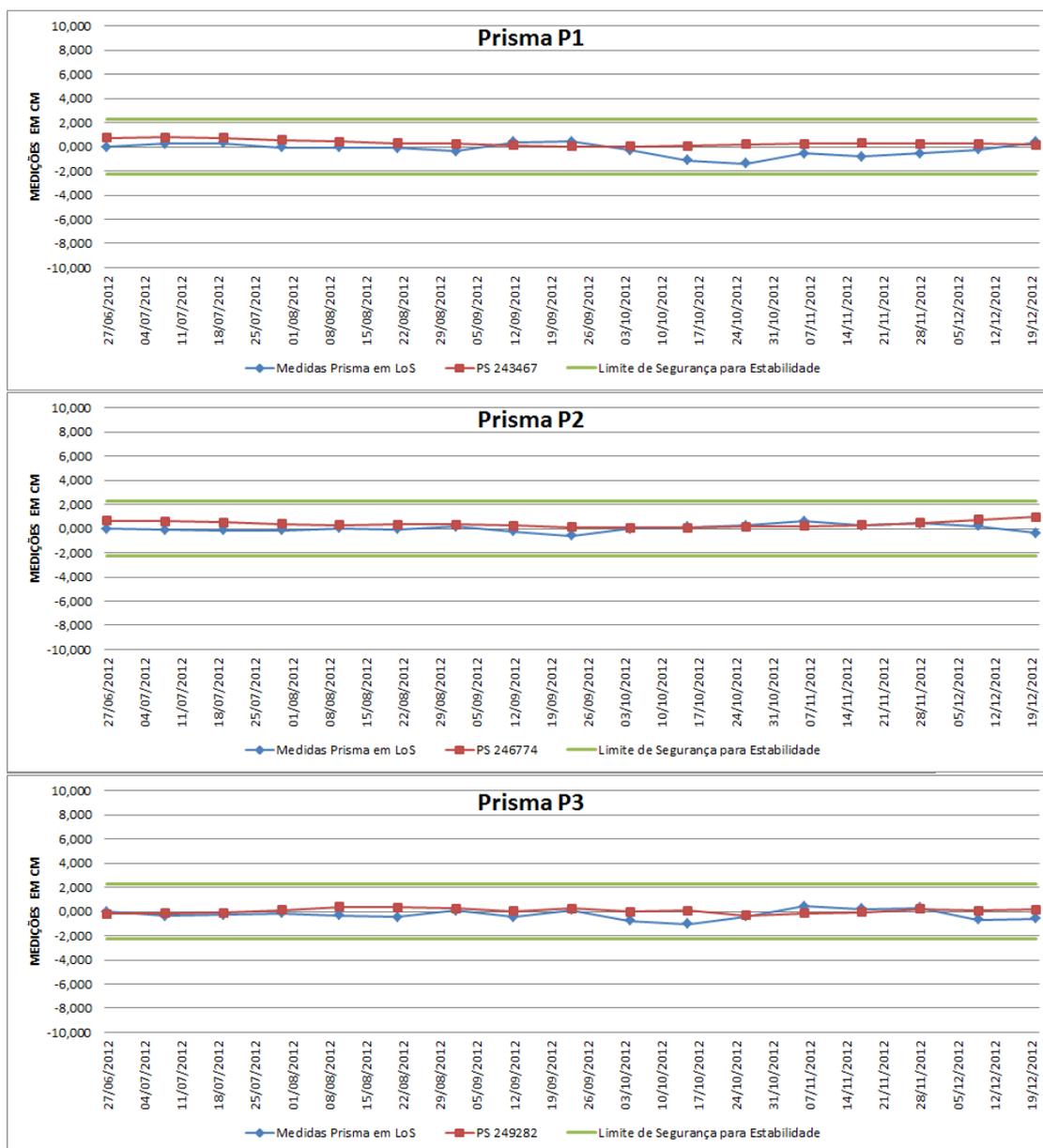
Figura 5.36. Prismas para validação, flanco Norte da Mina N4E, borda da PDE W.



Fonte: Produção do autor.

Na validação da primeira área, os gráficos dos prismas P1, P2 e P3, identificados na Figura 5.37, demonstram a concordância das mensurações entre as medidas de campo e as medidas de PSI.

Figura 5.37. Gráfico dos prismas para validação, prismas P1, P2 e P3.



Fonte: Produção do autor.

Como pode ser visto na Figura 5.37, observou-se que as medições para ambas as técnicas encontram-se dentro dos limiares aceitáveis de operação.

Entretanto observa-se nos gráficos do Prisma 1 e Prisma 3 uma certa discrepância das medidas dos prismas e PS, entre os meses de outubro e novembro. Fato este que possivelmente relaciona-se ao aumento significativo da precipitação na área, conforme visto na Figura 3.13, que pode ter ocasionado às discrepâncias nas mensurações.

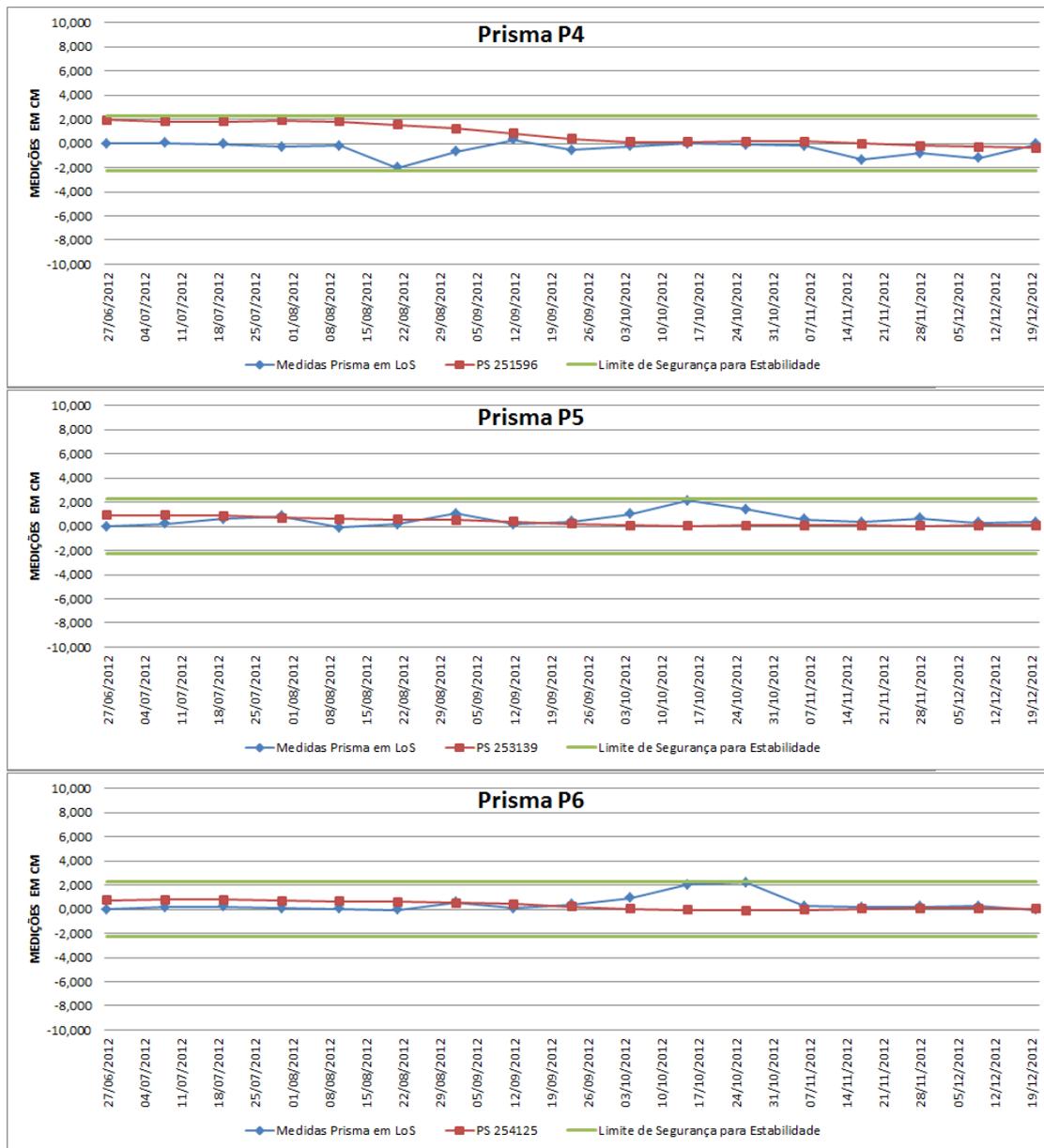
Na Figura 5.38 observa-se os gráficos para os Prismas P4, P5 e P6, que apresentam uma maior discrepância nas medições. Cabe salientar, entretanto, que os pontos PS encontram-se mais afastados dos prismas quando comparados aos prismas P1-P3.

Considerando o limite de segurança referenciado pela equipe da Vale, observa-se que durante o período analisado, na localidade tida como estável, tanto os resultados obtidos pela abordagem PSI quanto os de campo, indicaram estabilidade da superfície.

Observa-se também que há um salto entre as medidas dos prismas *versus* as medidas dos PS dessa série (P4 a P6). No prisma P4, observa-se a discrepância entre as medições ocorrendo de junho a agosto de 2012, período este que verificamos a diminuição gradativa da precipitação na região (Figura 3.13), o que possivelmente deve acarretar uma diferença nas medidas finais dos PS, explicado de certo pelo atraso do sinal ocasionado pela atmosfera.

As ocorrências de diferenças das medidas para os Prismas P5 e P6 observados, possivelmente relacionam-se ao aumento significativo da precipitação na área, conforme visto na Figura 3.13, que pode ter ocasionado às discrepâncias nas mensurações vistas entre os meses de outubro a novembro de 2012.

Figura 5.38. Gráfico dos prismas para validação, prismas P4, P5 e P6.

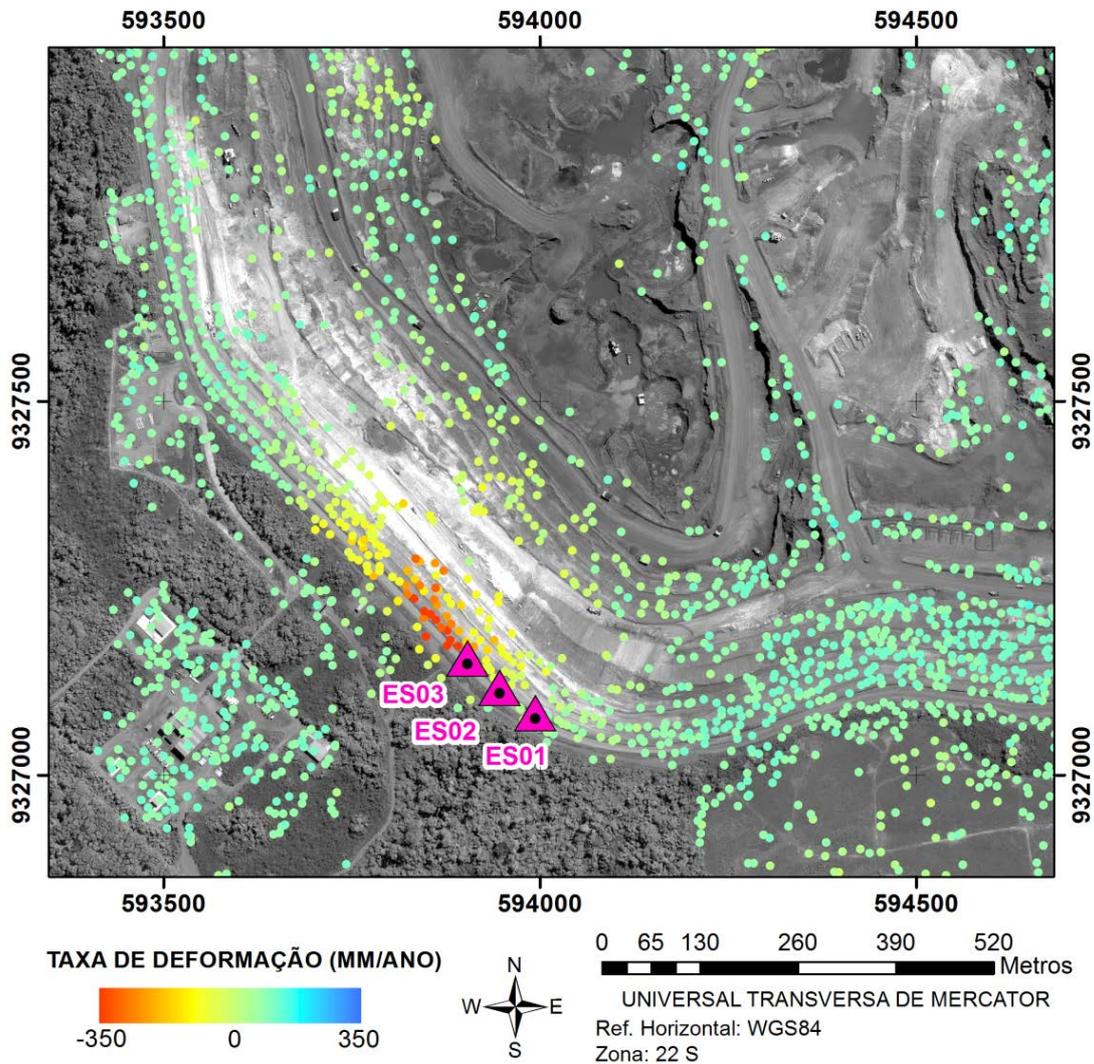


Fonte: Produção do autor.

A segunda área para a validação foi na mina N5W. Devido às evidências de movimentação superficial na localidade (Figura 5.41), foram instalados prismas nos taludes da mina, como pode ser observado nas marcações ES01, ES02 e ES03 nas Figuras 5.39 e 5.40. Tais taludes demonstram um comportamento de

subsidiência em LoS, traduzindo uma movimentação de a fastamento do satélite, como representado na Figura 5.36.

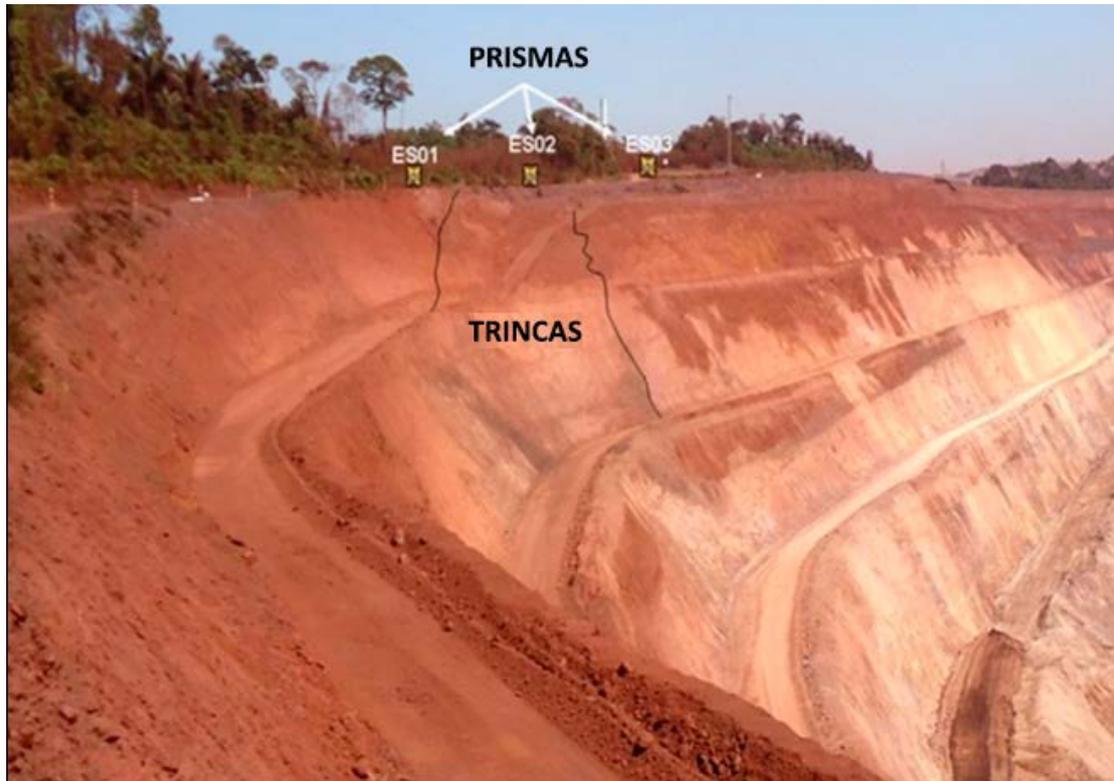
Figura 5.39. Evidência de trinca na rampa do talude da mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

Foram detectadas trincas nos taludes, bem como na estrada de acesso, evidenciando um movimento direcionado para dentro da cava, como pode ser visto nas Figuras 5.40 e 5.41.

Figura 5.40. Evidência de trincas com orientação para o interior da mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

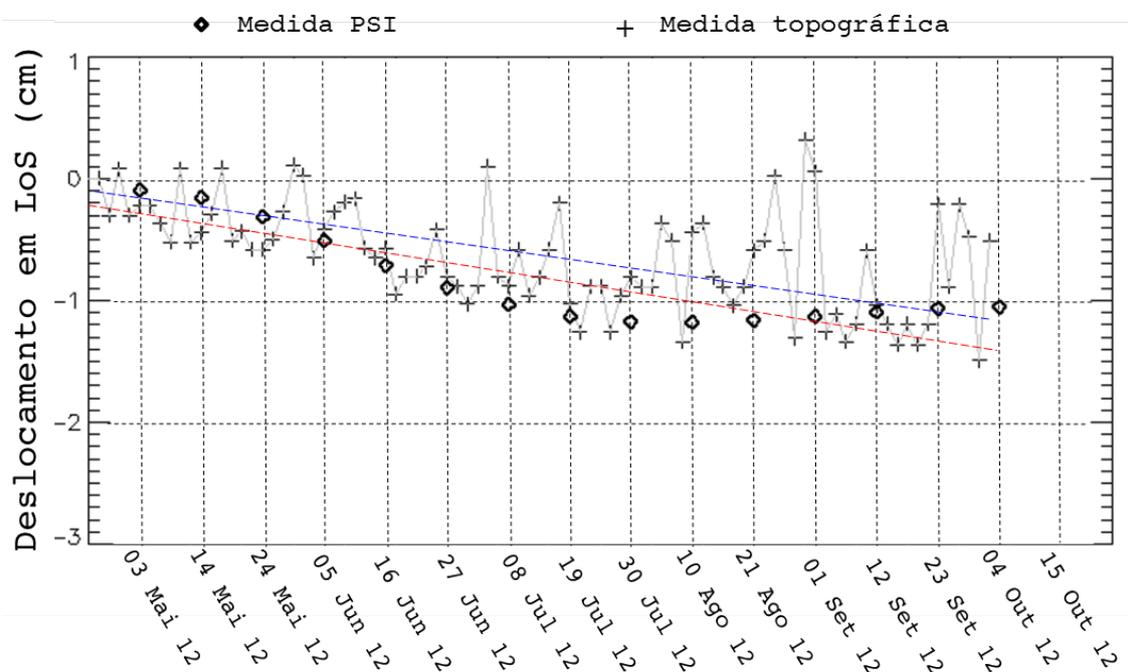
Figura 5.41. Evidência de trincas no talude da mina N5W (a) e na estrada acima do talude da mina N5W (b).



Fonte: Produção do autor.

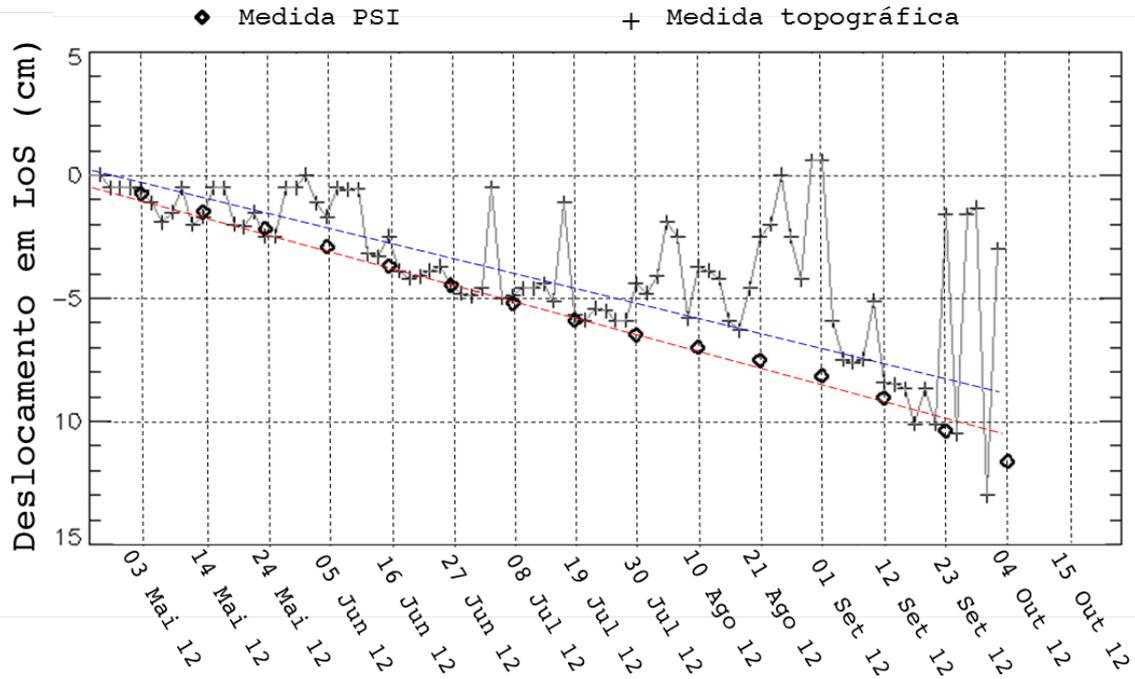
Durante o período de aquisição dos dados TSX-1, as bancadas da mina N5W foram monitoradas com estação total/prismas. Foram comparadas as medidas de prisma disponíveis de 24 de abril de 2012 até 28 de setembro de 2012 com os resultados da junção das técnicas PSI e DTS (os PS foram selecionados nas proximidades dos prismas locais) na data de aquisição de 03 de maio de 2012 a 04 de outubro de 2012 a cada 11 dias. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44.

Figura 5.42. Gráfico do prisma ES01 para validação do talude de corte da mina N5W.



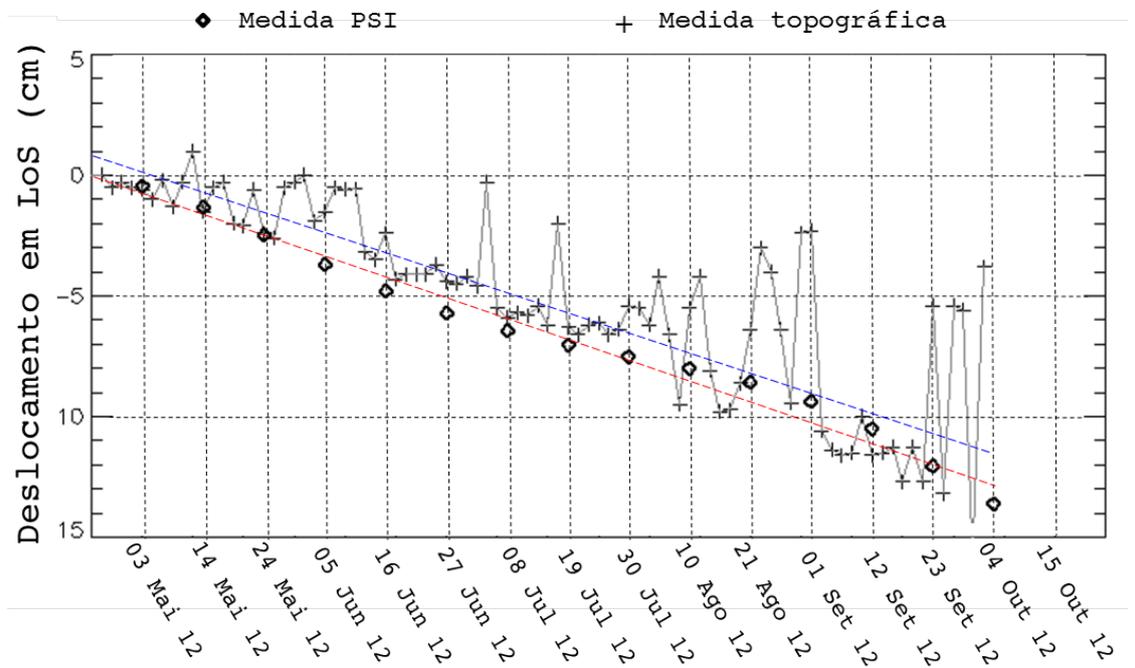
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.43. Gráfico do prisma ES02 para validação do talude de corte da mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.44. Gráfico do prisma ES03 para validação do talude de corte da mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

As medições topográficas por estação total/prismas mostram alta variabilidade, como pode ser observado nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44, devido provavelmente a precisão instrumental de campo, a mudanças de posição da estação total e de operadores desta em cada medição.

O erro calculado entre as medições do PSI e dos prismas mostrou os seguintes resultados: diferença de média igual a 0,085 cm, 1,19 cm e 1,29 cm para os prismas ES01, ES02 e ES03, respectivamente; RMSE de 0,25 cm, 2,29 cm e 1,95 cm para o prisma ES01, ES02 e ES03, respectivamente. Mesmo considerando esses erros, há uma boa concordância dos deslocamentos obtidos com a técnica aplicada (PSI+DTS) e medidas topográficas em termos de tendência a subsidência para os três prismas estudados.

5.3. Classes geomecânicas *versus* deformações

Cruzando-se as distribuições espaciais das classes geomecânicas com os mapas de medidas de de formação obtidos pela abordagem PSI+DTS, foi possível correlacionar as classes geomecânicas com a quantidade de PS por área (Tabela 5.10).

Analisando os resultados das minas N4W e N4E, nota-se que estas apresentam alta taxa de P S por unidade de área para as classes geomecânicas “II – Muito Bom” (2.069,61 PS/Km² para a N4W e 2.640,98 PS/Km² para a N4E) e “III – Bom” (2.109,42 PS/Km² para a N4W e 2.584,44 PS/Km² para a N4E).

Nota-se também que as classes geomecânicas com áreas de maior extensão são as classes “IV – Ruim” e “V – Muito Ruim” (Tabela 5.10), as quais totalizam uma cobertura de cerca de 98% para a mina N4W e de 84% para a mina N5E. Baixas taxas de PS nestas duas últimas classes estariam associadas a taxas de deformação muito altas ou a processos de exploração mais intenso.

Na Tabela 5.10 também estão apresentados os resultados das minas do complexo N5. Em N5W e N5E temos também o domínio em extensão de área para as classes “IV – Ruim” e “V – Muito Ruim”, totalizando uma cobertura para a mina N5W de cerca de 93% do total (24% de cobertura da classe “IV – Ruim” e 69% de cobertura para “V - Muito Ruim”), como pode ser observado na Figura 4.25, e para a mina N5E uma cobertura de cerca de 67% do total (46% de cobertura da classe “IV – Ruim” e 21% de cobertura para “V - Muito Ruim”).

Em relação as taxas de PS por Km² nota-se que para a classe “II – Muito Bom” da mina N5W, a taxa não foi muito alta (873,61 PS/Km²), provavelmente devido a pequena área representada por esta classe (Figura 4.25), já para a classe “III – Bom” da N5W, a taxa foi bastante significativa (2.461,11 PS/Km²) mesmo considerando a pequena área ocupada por esta classe.

Para a mina N5E, todas as classes apresentaram pouca quantidade de PS, provavelmente devido a sua pequena área de cobertura, mas uma elevada taxa de PS/Km² (“II – Muito Bom”, 2741,25 PS/Km²; “III – Bom”, 2532,55 PS/Km²; “IV – Ruim”, 2336,51 PS/Km²; “V – Muito Ruim”, 1737,60 PS/Km²), muito provavelmente devido a pouca atividade minerária nesta mina.

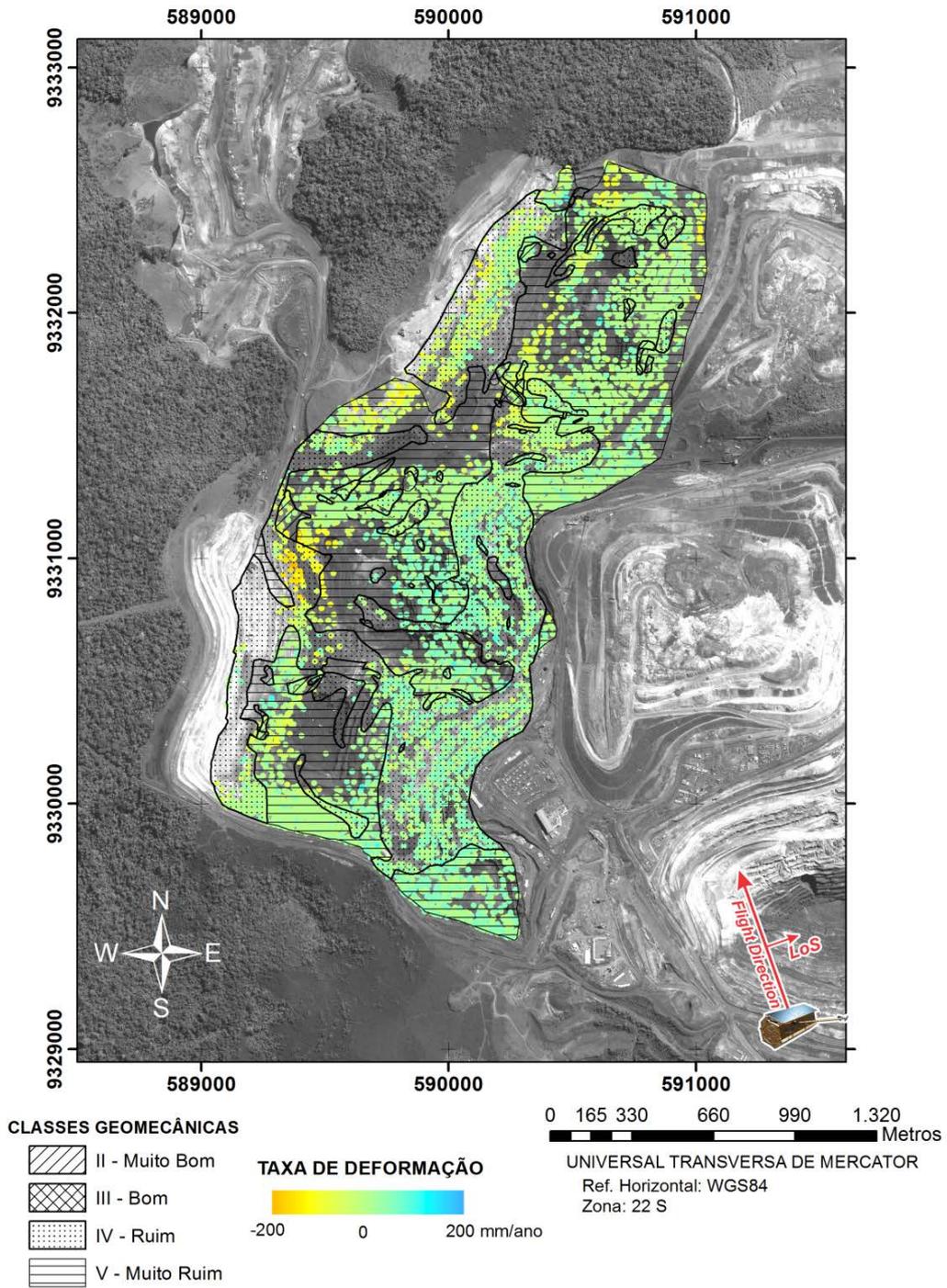
Tabela 5.9–Relação de PS por área das minas do Complexo.

N4						
W				E		
Classes Geomecânicas	Área (km²)	N.º de PS	PS/km²	Área (km²)	N.º de PS	PS/km²
II - Muito Bom	0,05	110,00	2.069,61	0,43	1.132,00	2.640,98
III - Bom	0,02	47,00	2.109,42	0,35	904,00	2.584,44
IV - Ruim	1,31	2.310,00	1.766,96	2,70	5.152,00	1.907,20
V - Muito Ruim	2,14	3.433,00	1.605,19	1,21	2.739,00	2.255,80
N5						
W				E		
Classes Geomecânicas	Área (km²)	N.º de PS	PS/km²	Área (km²)	N.º de PS	PS/km²
II - Muito Bom	0,10	90,00	873,28	0,23	635,00	2.741,25
III - Bom	0,02	53,00	2.461,11	0,07	170,00	2.532,55
IV - Ruim	0,41	756,00	1.862,54	0,41	968,00	2.336,51
V - Muito Ruim	1,14	1.754,00	1.536,49	0,19	330,00	1.737,60

Fonte: Produção do autor.

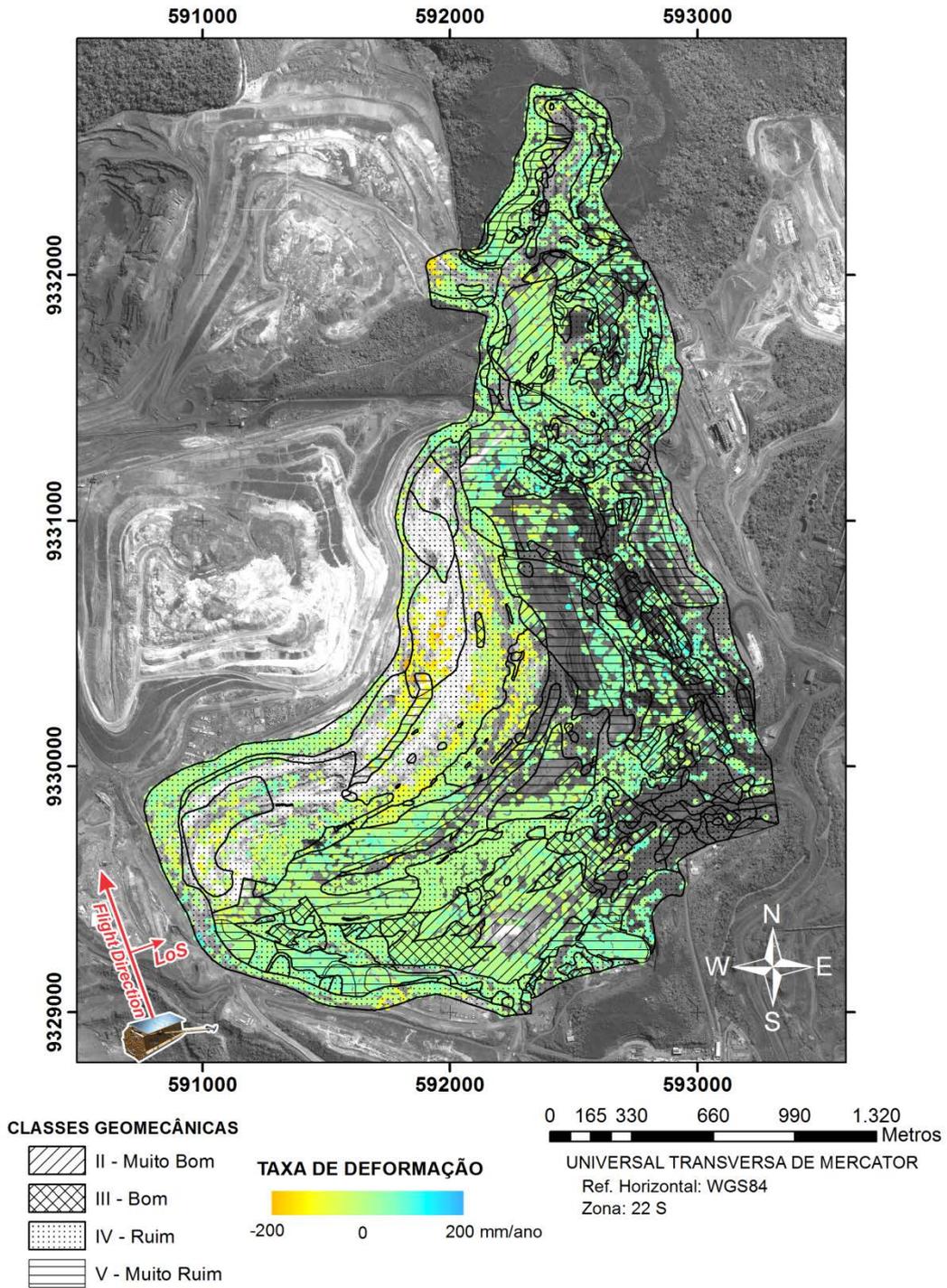
As Figuras 5.45 e 5.46 apresentam as classes geomecânicas e as deformações ocorridas nas minas N4W e N4E, respectivamente. Observando estas figuras, verifica-se que para ambas as minas do complexo N4 os deslocamentos superficiais mais relevantes estão relacionados às classes geomecânicas “IV – Ruim” e “V - Muito Ruim”. Isso mostra que, além da atividade de mineração, as características geomecânicas desempenham um papel fundamental no processo de movimentação de superfície nestas minas.

Figura 5.45. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N4W.



Fonte: Produção do autor.

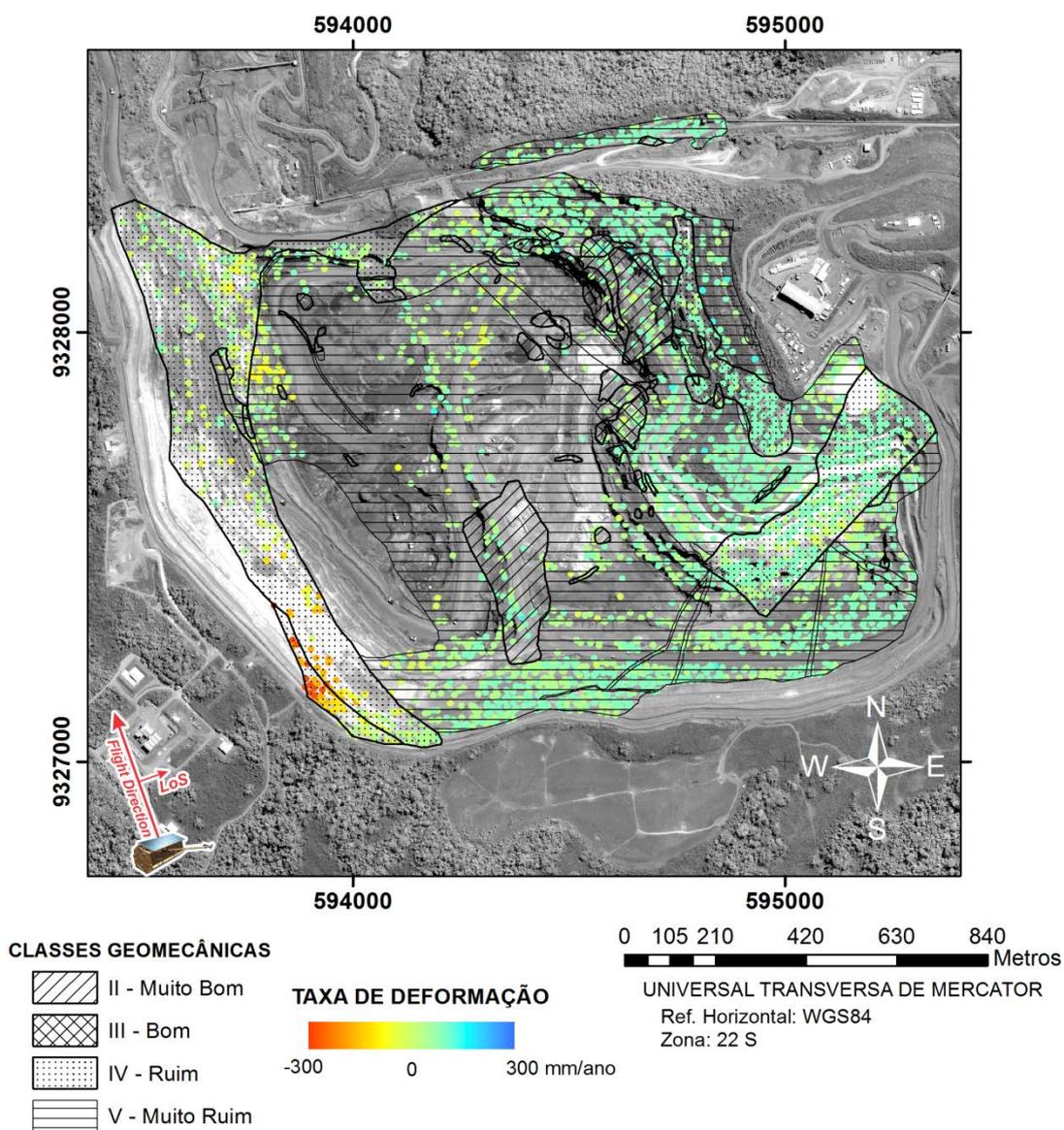
Figura 5.46. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N4E.



Fonte: Produção do autor.

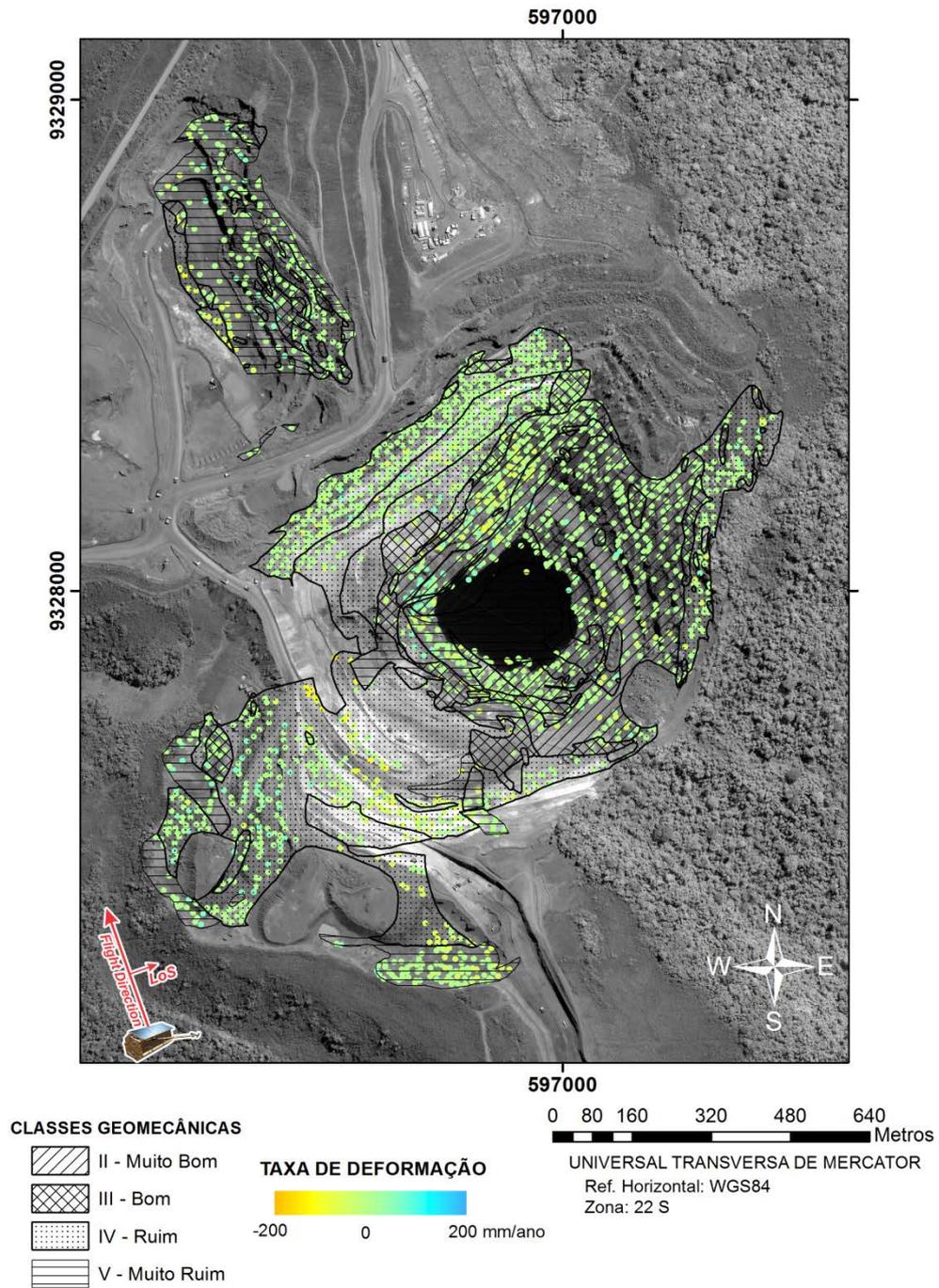
As Figuras 5.47 e 5.48 apresentam as classes geomecânicas e as deformações ocorridas nas minas N5W e N5E, respectivamente. Observando estas figuras, verifica-se que igualmente a discussão dos mapas de deformações anteriores (Figuras 5.45 e 5.46), ambas as minas do complexo N5 apresentam deslocamentos superficiais mais relevantes também relacionados às classes geomecânicas “IV – Ruim” e “V - Muito Ruim”.

Figura 5.47. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.48. Taxas de deformação e classes geomecânicas da mina N5E.



Fonte: Produção do autor.

Para a discussão e validação dos resultados aqui contidos, elaborou-se uma classificação de deformações conforme a medida realizada em cada PS, como definido a seguir:

- Subsidiência: pontos < -22,53 mm;
- Estável: pontos contidos entre -22,53 mm e 22,53 mm;
- Soerguimento: pontos > 22,53 mm.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos com a classificação proposta.

Tabela 5.10 – Classificação por classes geomecânicas e deformações para as minas N4E, N4W, N5E e N5W.

		Classes Geomecânicas			
	Classes de Deformação (%)	Muito Bom	Bom	Ruim	Muito Ruim
Mina N4E	Subsidiência	27,34	22,01	35,39	20,88
	Estável	70,90	72,23	61,21	73,20
	Soerguimento	1,76	5,75	3,40	5,91
	Classes de Deformação (%)	Muito Bom	Bom	Ruim	Muito Ruim
Mina N4W	Subsidiência	41,82	40,43	30,48	31,23
	Estável	57,27	55,32	65,54	66,15
	Soerguimento	0,91	4,26	3,98	2,62
	Classes de Deformação (%)	Muito Bom	Bom	Ruim	Muito Ruim
Mina N5E	Subsidiência	0,00	41,18	48,76	54,85
	Estável	97,13	58,82	51,14	44,24
	Soerguimento	2,87	0,00	0,10	0,91
	Classes de Deformação (%)	Muito Bom	Bom	Ruim	Muito Ruim
Mina	Classes de Deformação (%)	Muito Bom	Bom	Ruim	Muito Ruim

N5W	Subsidência	16,67	7,55	37,57	15,79
	Estável	67,78	75,47	53,70	75,83
	Soerguimento	15,56	16,98	8,73	8,38

Fonte: Produção do autor.

Verificando os resultados obtidos por mina na Tabela 5.11 nota-se uma conformidade dos resultados de deformação, quando cruzando com as classes geomecânicas.

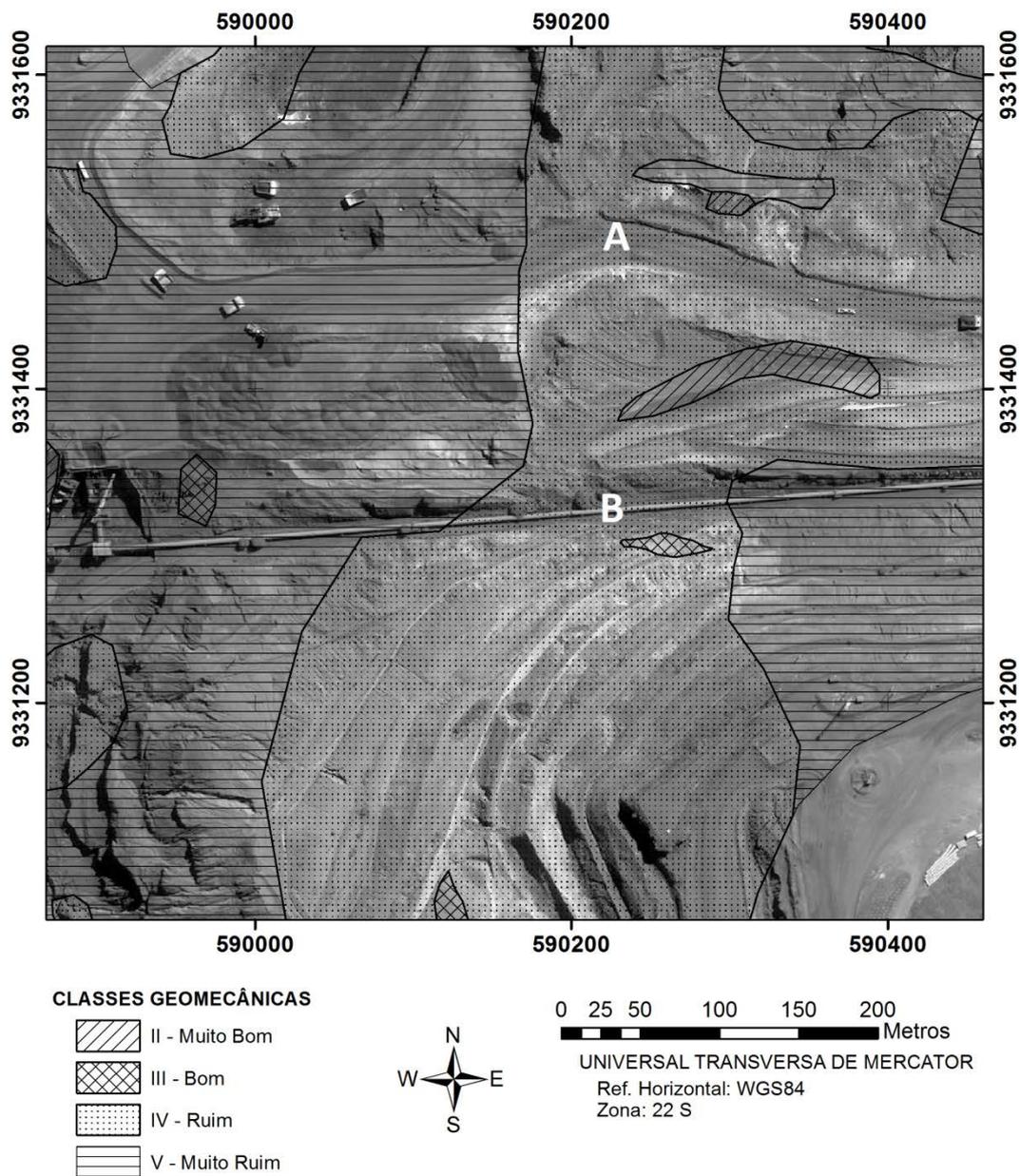
Na mina N4E verifica-se uma maior porcentagem de pontos estáveis, sendo a mina que possui maior controle de estabilidade e segurança no período de estudo, exatamente por ser a mina que está em processo contínuo de lavra, lembrando que esta mina apresenta uma alta taxa de PS/Km², como pode ser visto na Tabela 5.11, devido provavelmente as classes litológicas que a compõem (Jaspilito, Máfica Sã e Hematita Dura), conforme Paradella et al. (2015b).

A mina N4W, apesar de não sofrer na mesma magnitude do processo minerário da mina N4E, também está sendo lavrada e controlada pela equipe geotécnica e de segurança do trabalho. Verifica-se nesta mina que para as classes “II – Muito Bom” e “III – Bom”, têm-se as taxas de concentração de OS estáveis em 57,27% e 55,32% respectivamente.

As áreas apontadas como “IV – Ruim” e “V – Muito Ruim” na mina N4W, também apresentam resultados com taxas elevadas de PS dentro dos limites estáveis (65,54% e 66,15% respectivamente), o que pode ser explicado pelo fato destas classes geomecânicas em parte englobarem locais com presença de atividades operacionais da infraestrutura da mina como, por exemplo, rampas de acesso com movimentação de caminhões fora da estrada (Figura 5.49, setor A) e esteiras de minérios (Figura 5.49, setor B).

Na mina N5E, conforme informações da empresa e seu plano de lavras, não sofreram grandes movimentações no período do estudo, verificando-se também a estabilidade predominante nesta localidade, evidenciados pelas taxas de 97,13% para a classe “II – Muito Bom”, 58,82% para a classe “III – Bom” e 51,14% para a classe “IV – Ruim”. Constatou-se uma taxa de subsidência de 54,85%, resultado este que pode estar correlacionado com a classificação geomecânica “V – Muito Ruim” desta localidade. Outra hipótese pode ser o não retaludamento dessa área, devido ao período sem operação minerária intensa na localidade, mantendo o solo do horizonte superior, mais compactado, sem movimentação.

Figura 5.49. Análise dos resultados de classificação por deformações para a mina N4W.



Fonte: Produção do autor.

Na mina N5W observa-se boa coerência de estabilidade nas porcentagens e suas respectivas classes geomecânicas. Cabe salientar, contudo, que ainda há uma elevada taxa de pontos estáveis para a classe “V – Muito Ruim”, que poderia ser explicado pelo fato do acesso principal para o complexo minerário ser realizado pelos flancos desta mina, criando uma compactação do solo

ocasionado pelo intenso trânsito de veículos, como pode ser visto na Figura 5.50 (linhas demarcadas em vermelho).

Na classe “IV – Ruim” temos uma porcentagem significativa de deformação (37,57%) que pode estar relacionada às altas taxas deformacionais encontradas nos taludes de corte da mina N5W, como pode ser observado na Figura 5.45, bem como pode também relacionar-se a declividade contida na área dessa classe, onde se verificou declives superiores a 30° de inclinação (Figura 3,18).

Figura 5.50. Acesso ao complexo minerário pela mina N5W.



Fonte: Produção do autor.

6 CONCLUSOES E RECOMENDACOES

Da análise dos resultados obtidos e validados no item 5, vemos que a integração das técnicas DTS e PSI mostrou-se uma alternativa robusta, com resultados consistentes, oferecendo uma boa opção no monitoramento de áreas de grande extensão como a área teste, com altas taxas de deformação superficial e não lineares, como pode ser visto nas Figuras 5.30, 5.32 e 5.34, características estas não alcançadas pela técnica de *Persistent Scatterer* (PS).

Como visto nas discussões, o resultado obtido com a metodologia utilizada mostrou-se apropriado, cumprindo sua função de ampliação do recobrimento das medições de deformações. Como pode-se verificar, as maiores deformações foram encontradas nas áreas das Pilhas de Deposição de Estéril (PDE) e dentro do esperado para os limites de recalque para a área. Verifica-se que com o afastamento do ponto tomado como referência para o processamento, há um aumento nos erros das medições, como pode ser visto na Figura 5.32, possivelmente relacionado ao desdobramento da fase interferométrica ou a processo relacionado com a remoção da fase atmosférica.

Os resultados obtidos pela metodologia proposta, quando validados com dados de campo fornecidos pela Vale S.A. (prismas e levantamento geotécnico da localidade), mostraram em geral uma concordância entre suas medidas (PS com Prismas; e PS com classes geomecânicas). A junção das técnicas DTS e PSI apresentou resultados apropriados e indicou um potencial para possibilidades de monitoramento operacional de deformações superficiais, possibilitando ampla cobertura em área e com acurácia milimétrica.

Cabe ressaltar que a complementaridade de uso integrado das informações de campo (estação total/prismas, etc.) e remota (DInSAR orbital) se configura como a melhor alternativa para fins de monitoramento operacional de grandes áreas no planejamento e análise de risco neste tipo de empreendimento mineral.

Recomenda-se em pesquisas futuras a utilização de duas visadas do satélite (tomadas em órbitas ascendente e descendente), possibilitando com isto a obtenção da componente vertical de deformação superficial, em áreas extensas de recobrimento com uso da metodologia aplicada neste trabalho. Além disso, observa-se o potencial de utilização desta técnica no monitoramento de problemas relacionados a Defesa Civil, ou ainda ao monitoramento contínuo de infraestruturas, baseando em série temporal de imagens de radar. Com os dados do sensor Sentinel-1 da ESA, atualmente disponibilizados gratuitamente, pode-se ter soluções de baixo custo no monitoramento InSAR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios** / Adolpho José Melfi, Aroldo Misi, Diogenes de Almeida Campos e Umberto Giuseppe Cordani (organizadores). Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. Disponível em: <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. **Província Mantiqueira – Setor Setentrional**. In: O Pré-Cambriano do Brasil, Ed. Edgard Bluecher Ltda, p. 282-307, 1984.

ALMEIDA, F.F.M. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1967. v. 241, 36p.

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. **IEEE Trans, Geosci, Remote Sens**, v. 40, n. 11, November, p. 2375-2383, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de manejo da Floresta Nacional de Carajás – diagnóstico**, vol,I, março de 2016. 2016. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/biodiversidade/UC-RPPN/DCOM_ICMBio_plano_de_manejo_Flona_Carajas_volume_I.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2016.

_____. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, RJ. 2012. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA** :Banco de dados

geomorfométricos do Brasil .São José dos Campos, SP. Disponível em:
<<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso em: 06 fev. 2017.

_____. Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral. **Portaria n.º 237, de 18.10.2001**. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração – NRM, de que trata o Art. 97 do Decreto-Lei nº227, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, DF. Disponível em:
<<http://www.dnrm.gov.br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnrm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-237-em-18-10-2001-do-diretor-geral-do-dnrm>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

_____. **Lei n.º 9.985, de 18.07.2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, 19 jul. 2000. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm>. Acesso em: 29 nov. 2016.

_____. **Decreto n.º 2.486, de 02.02.1998**. Cria a Floresta Nacional de Carajás, no Estado do Pará, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, 03 fev. 2001. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2486.htm>. Acesso em: 29 nov. 2016.

BVP Engenharia. **Mapeamento litoestrutural e litogeomecânico da Mina N5W**. Relatório Interno da Vale. Agosto de 2011. 61 p.

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA F. Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique. **Eng, Geol**, v. 68, p. 3–14, 2003.

CORDANI U.G. The geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 1-3, p.77-88, 1988.

COUTINHO, M.G.N. **Província mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa previsional para Ouro em SIG** / [organizado por] Maria Glíciada Nóbrega Coutinho - Rio de Janeiro : CPRM,2008.

CROSETTO, M.; BIESCAS, E.; DURO, J.; CLOSA, J.; AMAUD, A. Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 4, p. 443-450, 2008.

CROSETTO, M.; CRIPPA, B.; BIESCAS, E. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. **Engineering Geology**, v.79, p. 81-91, 2005.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Radar de Abertura Sintética (SAR-Synthetic Aperture Radar)**. Desenvolvido por Eduspace Global, 26 fev. 2014. Disponível em: <
http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_PT/SEMF5D6UQH_0.html>. Acesso em: 09 nov. 2015.

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

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. **IEEE Trans, Geosci, Remote Sens**, v. 38, n. 5, p. 2202-2212, 2000.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE

SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 1999), 1999, Hamburg (Germany), 28 June–2 July. **Proceedings...** Hamburg, 1999. v. 3, p, 1528–1530.

FREITAS, C.C.; SANT'ANNA, S.J.S.; RENNO, C.D.; CORREIA, A.H.

Utilização de imagens de radar de abertura sintética na classificação do uso e ocupação do solo. São José dos Campos: INPE, 2007-08-11. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/08.10.18.20). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/08.10.18.20>. Acesso em: 22 mar. 2017.

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.; 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, 2015, p, 1539-1546, Internet, ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM48UL>. Acesso em: 26 out. 2015.

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: 29 jan. 2016.

GAMMA REMOTE SENSING. **User's guide version 1.4.** Bern, Switzerland: GAMMA Remote Sensing and Consulting AG, 2013.

GOLDSTEIN, R.M.; ZEBKER, H.; WERNER, C.L. Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v, 23, n, 4, p, 713-720, Aug, 1988.

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

GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ. **Economia**. 2010. Disponível em: <http://www.pa.gov.br/O_Para/economia.asp>. Acesso em: 06 nov. 2015.

HOLDSWORTH, R.E.; PINHEIRO, R.V.L. The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. **Journal of Structural Geology**, v. 22, p.1105-1123, 2000.

HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. L23611, 2004. doi: 10.1029/2004GL021737.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Brasília, Outubro/2015, 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em: 20 nov., 2016.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING & METALS – ICMM. **O setor de mineração no Brasil: criar instituições para o desenvolvimento sustentável**. Mineração: parcerias para o desenvolvimento – Série Spotlight 17, junho, 2012. Disponível em: <<http://hub.icmm.com/document/3730>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

MACAMBIRA, M.J.B.; LAFON, J.M.; DALL’AGNOL, R.; COSTI, H.; JORGE JOÃO, X.S. Geocronologia da granitogênese da Província Amazônia Central Brasileira: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 20, n. 1-4, p. 258-266, março/dezembro, 1990.

MASSONNETT, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; ADAGNA, F.; PELTZER, G.; FEIGL, K.; RABAUTE, T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**, v, 364, n. 8, p.138–142, 1993.

METI/JAXA. Basic principle of radar (SAR). In: SENTINEL ASIA SYSTEM (SAS) OPERATION TRAINING, 2012, Bangkok, Thailand. **Proceedings...** Tokyo, Japan: Remote Sensing Technology Center of Japan, , 2012.

Disponível em:

<<https://sentinel,tksc,jaxa.jp/sentinel2/webresources/capacityBuilding/download?dataId=SECRisis0001201208230002>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

MORAIS, M.C. **Discriminação de lateritas mineralizadas em ferro no depósito de N1 (Carajás-PA) por radar imageador: uma avaliação através de classificação textural**, 1998, 193 p. (INPE-7165-TDI/673). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998. Disponível em:

<<http://urlib,net/sid,inpe,br/deise/1999/08,18,16,12>>. Acesso em: 18 nov, 2015.

MURA, J.C.; PARADELLA, W.R.; GAMA, F.F.; SILVA, G.G.; GALO, M.; CAMARGO, P.O.; SILVA, A.Q.; SILVA, A. Monitoring of Non Linear Ground Movement in Open Pit Iron Mine Based on an Integration of Advanced DInSAR Techniques Using TerraSAR-X Data. **MDPI Remote Sensing Journal**, v. 8, n. 409, 2016. doi:10.3390/rs8050409. ISSN 2072-4292.

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: SAR IMAGE ANALYSIS, MODELING, AND TECHNIQUES, 14,, 2014, Amsterdam, **Proceedings...** 2014, v, Proc, of SPIE Vol, 9243, p, 1-18,On-line, ISBN 0277-786X, doi: <10,1117/12,2066886>.

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: 24 fev. 2016.

NIEVINSKI, F.G. **Interferometria por radar de abertura sintética (InSAR)**. 2004. 88 p. Trabalho de Conclusão de Graduação (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Curso de Engenharia Cartográfica (UFRGS), Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/75664>>. Acesso em: 26 out. 2015.

PARADELLA, W.R.; MURA, J.C.; GAMA, F.F.; SANTOS, A.R.; SILVA, G.G. Radars Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015^a. p, 2506-2513. Internet, ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM4A4L>>. Acesso em: 26 out. 2015.

PARADELLA, W.R.; FERRETTI, A.; MURA, J.C.; COLOMBO, D.; GAMA, F.F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A.R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P.O.; 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, July 2015b, doi: <10.1016/j.enggeo,2015,04,015>.

PARADELLA, W.R. **Radar imageador**: princípios e aplicações. São José dos Campos: Inpe, 2015c. Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Curso SER-332-2, Versão 2015.

PARADELLA, W.R.; MURA, J.C.; GAMA, F.F.; SANTOS, A.R.; GALO, M.; CAMARGO, P.O.; SILVA, A.Q.; SILVA, G.G. **Deteção 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.; SILVA, G.G.; GALO, M.; CAMARGO, P.O.; SILVA, A.Q. Complementary use of information from space-based DInSAR and field measuring systems for operational monitoring purposes in open pit iron mines of Carajás mining complex (brazilian amazon region). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v, 40, p, 905-911, 2015e. doi: <10,5194/isprsarchives-XL-7-W3-905-2015>.

PARADELLA, W.R.; CHENG, P. Using GeoEye-1 stereo data in mining applications: automatic DEM generation. **Geoinformatics**, v, v. 16, n. 2013, p. 10-12, Jan.-Feb. 2013. Disponível em: <http://fluidbook.geoinformatics.com/GEO-Informatics_1_2013/>. Acesso em: 22 mar. 2017.

PARADELLA, W.R. **Geração de modelos digitais de elevação através da radargrametria com imagens do satélite Radarsat-1**. Processo FAPESP PIPE 1999/06271-7, São José dos Campos: INPE/Geoambiente Sensoriamento Remoto Ltda., 2002.

PELTZER, G.; ROSEN, P.A. Surface displacement of the 17 Eureka valley, California, earthquake observed by SAR interferometry. **Science**, v. n. 268, June, p. 1333-1336, 1995.

PEREIRA, R. M. P. **Geologia da região sul da Serra Norte e características do minério de ferro do depósito N8, Província Mineral de Carajás**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 131, 2009.

PINTO, C.A.; PARADELLA, W.R.; MURA, J.C.; GAMA, F.F.; SANTOS, A.R.; SILVA, G.G.; HARTWIG, M.E. Applying persistent scatterer interferometry for surface displacement mapping in the Azul open pit manganese mine (Amazon region) with TerraSAR-X StripMap data. **Journal Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, 095978, Dec 22, 2015. doi: <[http://dx.doi.org/10,1117/1,JRS,9,095978](http://dx.doi.org/10.1117/1,JRS,9,095978)>.

PINTO, C.A. **Detecção de deformações superficiais na Mina do Manganês do Azul através da interferometria de radar orbital**. 2015. 193 p. (sid,inpe.br/mtc-m21b/2015/07,31,16,19-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JUHDQH>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

PINTO, D.E. **Radar de Abertura Sintética (SAR): uma breve apresentação sobre o funcionamento e capacidades**. Artigo Científico, Escola de Artilharia de Costa e Antiaérea (ESACOSAAE), Site aprovado por BI DECEX n,º 042 – 11 jun, 2013. Disponível em: <<http://www.esacosaae.ensino.eb.br/ArtigosCientificos%202009/Radar%20de%20Abertura%20Sintetica.pdf>>. Acesso em: 09 nov, 2015.

READ, J.; STACEY, P. (Ed.). **Guidelines for open pit slope design**. Collingwood, Austrália: CSIRO, 2009.496 p. ISBN 978-0-415-87441-0.

REBELO, C,R, **Aplicação do InSAR na geração de modelos digitais do terreno**. 2007. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Matemática, Lisboa, Portugal, 2007. Disponível em: <http://enggeoespacial.fc.ul.pt/ficheiros/teses/tese_carla_rebelo.pdf >. Acesso em: 30 out, 2015.

MESQUITA, J. Em Parauapebas, riqueza tem prazo de validade. **Revista Exame**, 30 abr, 2014 08:00h. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/revista->

exame/edicoes/1064/noticias/riqueza-com-prazo-de-validade>. Acesso em: 07 nov, 2015.

ROSEN, P.; WERNER, C.; FIELDING, E.; HENSLEY, S.; BUCKLEY, S.; VINCENT, P. A seismic creep along the San Andreas fault northwest of Park field, CA measured by radar interferometry. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n.6, p. 825-828, 1998.

SARTI, F. **Remote sensing and SAR images processing** – characterization and speckle filtering in radar images. Courtesy of CNES, ESA, 2011. Disponível em: <http://earth,eo,esa,int/download/eoedu/Earthnet-website-material/to-access-from-Earthnet/2011_ESA-CONAE-SAR-Capacity-Building-Argentina/Speckle.pdf>. Acesso em: 18 dez, 2015.

SCHMIDT, D.A.; BÜRGMANN, R. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California from a large InSAR data set. **J. Geophys.Res**, v. 108, n. B9, September, p. 2416-2429, 2003.

SENA, E. F.; PEREIRA, T.S.M.; ROSA, A.N.C.S. Análise de filtragem do ruído Speckle em imagens do Radar de Abertura Sintética do SIPAM, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013, p, 8390-8396, DVD, Internet, ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD), Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GM2B>>, Acesso em: 18 dez, 2015.

STROZZI, T.; WEGMULLER, U.; TOSI, L.; BITELLI, G.; SPRECKELS, V. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, November, p. 1261-1270, 2001.

TASSINARI, C.C.G.; MACAMBIRA, M.J.B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO, V. et. al, (Eds.). **Geologia do continente**

Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 471-485.

TRE EUROPA. **SqueeSAR™**. Disponível em: <<http://treuropa.com/technique/squeesar/>>. Acesso em: 22 nov, 2015.

USAI, S. A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2002), 2002, Toronto, CA. **Proceedings...** Toronto, ON, Canada: IEEE, 2002. p.1247-1250.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L.T. Geologia e recursos minerais do Estado do Pará. (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará** : Sistema de Informações Geográficas – SIG : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1: 1.000.000. Belém: CPRM, 2008. 328p.

VENEZIANI, P.; SANTOS, A, R.; PARADELLA, W, R. A Evolução tectono-estratigráfica da província mineral de Carajás: um modelo com base em dados de Sensores Remotos Orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM Landsat -5), aerogeofísica e dados de campo. **Geociências**, v, 34, n, 1, p, 67-78, mar, 2004. (INPE-11425-PRE/6857).

VICTORINO, H. S. **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**. 2016. 144 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.09.15.39-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LAKPKL>>. Acesso em: 09 fev. 2017.

WERNER, C,; WEGMULLER, U,; STROZZI, T,; WIESMANN, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: IEEE INTERNATIONAL

GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2003), 2003, Toulouse (France). **Proceedings...** Toulouse: IEEE, 2003. v. 7, p. 4362-4364.

WERNER, C, L.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMAN, A. **Gamma SAR and interferometric processing software, paper presented at ERS ENVISAT Symposium.** Gothenberg, Sweden: Eur, Space Agency, 2000.

WEGMÜLLER, U.; WERNER, C.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Multi-temporal interferometric point target analysis. In: Analysis of multi-temporal remote sensing images. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE MULTITEMP, 2003, Ispra, Italy. **Proceedings...** World Scientific Publishing Co Pte Ltd., 2004. v. 3, p. 136-144. Smits and Bruzzone (eds.). ISBN: 981-238-915-61. Series in Remote Sensing.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing.** Taylor & Francis, 2006. 400 p.