

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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.23.17.41-TDI

MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES EM SUPERFÍCIE NA MINA DE FERRO N5E/PROVÍNCIA CARAJÁS POR INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL AVANÇADA COM DADOS TerraSAR-X

Filipe Altoé Temporim

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Fábio Furlan Gama, e Waldir Renato Paradella, aprovada em 07 de março de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NJ9Q7P>

> 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 Fax: (012) 3208-6919 E-mail: pubtc@inpe.br

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

Presidente:

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

Membros:

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

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

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

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

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT) Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

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

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

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

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.23.17.41-TDI

MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES EM SUPERFÍCIE NA MINA DE FERRO N5E/PROVÍNCIA CARAJÁS POR INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL AVANÇADA COM DADOS TerraSAR-X

Filipe Altoé Temporim

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Fábio Furlan Gama, e Waldir Renato Paradella, aprovada em 07 de março de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NJ9Q7P>

> INPE São José dos Campos 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Temporim, Filipe Altoé.

 $\begin{array}{ll} {\rm T249m} & {\rm Monitoramento} \mbox{ de formações em superfície na mina de ferro} \\ {\rm N5E/província} \mbox{ Carajás por interferometria diferencial avançada} \\ {\rm com \ dados \ TerraSAR-X} \ / \ {\rm Filipe \ Altoé \ Temporim. - São \ José \ dos \ Campos : \ INPE, \ 2017. \end{array}$

xxx + 156 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.23.17.41-TDI)

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

Orientadores : Drs. Fábio Furlan Gama, e Waldir Renato Paradella.

TerraSAR-X. 2. Interferometria SAR. 3. Mina de N5E.
 Província mineral de Carajás. 5. Região Amazônica. I.Título.

CDU 528.88(811.3)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): Filipe Altoé Temporim

Título: "MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES EM SUPERFÍCIE NA MINA DE FERRO N5E/PROVÍNCIA CARAJÁS POR INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL AVANÇADA **COM DADOS TERRASAR-X"**

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

Sensoriamento Remoto

Orientador(a) / INPE / São Jos

Lênio Soares Galvão Dr.

Presidente / INPE / SJ

Campos - SP

a

Dr. Fábio Furlan Gama

Waldir Renato Paradella

0 augul

Campos - SP

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

José Claudio Mura Dr.

Dr.

1

Mémbro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Fernando Pellon de Miranda Dr.

⁄RJ Convidado(a) / Petrobrás / Rio de Janeiro

Este trabalho foi aprovado por:

- () maioria simples
- (A) unanimidade

"Se você fizer somente o que sabe, nunca será mais do que é agora".

Mestre Shifu.

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

AGRADECIMENTOS

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

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

À Késia, pelo companheirismo e amor, essenciais nos momentos cruciais de finalização deste trabalho.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido durante os dois anos de pesquisa.

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

Ao meu orientador Dr. Waldir Renato Paradella, que abriu as portas para minha participação neste grupo de pesquisa. Mesmo com todos os empecilhos e o afastamento, sempre esteve prestativo a qualquer situação.

Ao meu orientador Dr. Fábio Furlan Gama, por todo auxílio, orientação, paciência e diálogo.

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

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

Todos os meus amigos da turma SERE 2015, em especial ao grupo Bora Bora, cuja amizade trouxe força para superar todas as matérias.

Ao Dr. Paulo Fortes, por minha introdução à carreira científica, pela amizade, pelo apoio e incentivo para estar aqui e por nunca se ausentar.

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

RESUMO

Na Província Mineral de Carajás, região amazônica, se desenvolve a mais importante atividade de mineração do Brasil. A Vale S.A. tem o direito de operar na área da mina N5E, onde existem produtos de alteração de rochas de baixa gualidade geomecânica relacionados a arenitos, siltitos e cobertura laterítica. Para monitorar a deformação de superfície, foram utilizadas 33 imagens TerraSAR-X cobrindo o período de março de 2012 a abril de 2013. Foram aplicadas duas abordages de radar de abertura sintética interferométrica (InSAR) anvancadas: DInSAR baseadas em série temporal e PSI baseada em interferometria por espalhadores persistentes. Os resultados mostraram que a maior parte da mina pode ser considerada estável no período de cobertura de aquisição das imagens SAR. No entanto, as maiores taxas de deformações foram detectadas em locais mapeados como aterro, a norte da cava da mina, provavelmente relacionadas a mecanismos de recalque. Em outros setores onde houve subsidência em baixa escala, foram mapeadas estruturas geológicas, indicando que as deformações estão concentradas ao longo de um corredor de deformação composto por falhas, fraturas e dobras, relacionado ao Sistema de Falhas Carajás. Para validar os dados PSI, foram gerados gráficos com dados de deslocamento da medida topográfica de campo. Os gráficos mostraram que as deformações superficiais durante a cobertura das imagens TSX-1 estão dentro do limiar de segurança da mineradora e não apresentam risco de colapso. Além disso, a estratégia de medição baseada em ambos os interferométricos pode presumida processamentos ser como sendo representativa do deslocamento de superfície expresso por valores de prisma, com base na validação estatística. Os dados interferométricos forneceram uma visão sinóptica e detalhada do processo de deformação que afeta o complexo de mineração, sem a necessidade de campanha de campo ou instrumentação. Assim, a investigação enfatizou a importância que a tecnologia InSAR tem no monitoramento.

Palavras-chave: TerraSAR-X. Interferometria SAR. Mina de N5E. Província Mineral de Carajás. Região Amazônica.

MONITORING OF SURFACE DISPLACEMENTS IN IRON MINE N5E / CARAJÁS PROVINCE BY ADVANCED DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY USING TERRASAR-X DATA

ABSTRACT

The Mineral Province of Carajás, Amazon region, the most important mining activity of Brazil is developed. Vale S.A. has the right to operate in the area of the N5E mine, where there are products of alteration of rocks of low geomechanical quality related to sandstones, siltstones and a lateritic cover. In order to monitor surface deformation, were used 33 TerraSAR-X images covering the period from March 2012 to April 2013. Two interferometric synthetic aperture radar approaches (InSAR) were applied: DInSAR based on time series and PSI based on Interferometry by persistent scatterers. The results showed that most of the mine can be considered stable during the coverage period of acquisition of SAR images. However, the highest deformation rates were detected in a geological unit mapped as a landfill, north of the mine pit, probably related to accommodation mechanisms. In other sectors where there was low-scale subsidence, geological structures were mapped, indicating that the deformations is concentrated along the deformation corridor composed of faults, fractures and folds, related to the Carajás Fault System. To validate the PSI data, graphs were generated with displacement data of the field topographic measurement. The graphs showed that the surface deformations during the coverage period of acquisition of SAR images are within the miner's safety threshold and do not present a risk of collapse. Furthermore, the measurement strategy based on both interferometric processing may be presumed to be representative of the surface displacement expressed by prism values, based on statistical validation. The interferometric data provided a synoptic and detailed view of the deformation process that affects the mining complex, without the need for field campaigning or instrumentation. Thus, the research emphasized the importance of InSAR technology in monitoring.

Palavras-chave: TerraSAR-X. Interferometry SAR.N5E mine. Mineral Province of Carajás. Amazon region.

LISTA DE FIGURAS

<u>Pág</u>.

Figura 2.1 -	 Espectro eletromagnético no domínio de microondas com a 	
	nomenclatura das bandas de radar	8
Figura 2.2 -	Direções de propagação do campo elétrico: polarização vertical e	
	polarização horizontal 1	0
Fonte: Lewi	s e Henderson (1998) 1	0
Figura 2.3 -	- Geometria de imageamento de um sensor ativo 1	0
Fonte: Lewi	s e Henderson (1998) 1	0
Figura 2.4 -	Direções em azimute do sistema SAR, caso do TerraSAR-X 1	2
Figura 2.5-	Modos de imageamento do satélite TerraSAR-X 1	3
Figura 2.6-	Modos de aquisição do Satélite RADARSAT-2 1	4
Figura 2.7 -	- Radar de abertura Sintética, onde A representa o objeto imageado	C
	e B representa as posições ocupadas pela antena 1	6
Figura 2.8-	Geometria de interferometria SAR. Linha de base espacial	
	simultânea (a) e a partir de duas passagens em diferentes	
	momentos (b) 1	8
Figura 2.9 -	- Mapa de coerência da região nordeste de Sicília (Itália)	1
Figura 2.10	- Mapa de deformação em superfície da área da mina N5W em Los	3.
		5
Figura 2.11	 Mapa de deformação em superfície utilizando técnica DInSAR-TS 	,
	do Complexo Minerador de Carajás/Pará/Brasil. O vermelho é o	
	máximo afastamento do sensor, ao passo que o azul é a máxima	
	aproximação do sensor 2	5
Figura 2.12	llustração do comportamento da fase para (a) pixel com	
	espalhadores distribuídos e (b) pixel com espalhadores coerentes	
	(persistentes) 2	7
Figura 2.13	llustração dos componentes de fase de um ponto de retorno	
	persistente	8
Figura 2.14	Ilustração a modelagem de processamento da técnica IPTA 3	0

Figura 2.15 Distribuição espacial de pontos persistentes (PS) para mina e uma
pilha de rejeito, visualizadas pela linha de visada (LOS). Ao fundo
imagem pancromática GeoEye-1. Cenário para estações seca e
chuvosa
Figura 2.16 - Imageamento no mesmo sentido da órbita e em sentidos opostos,
podendo variar o ângulo de incidência das imagens
Figura 2.17 - Comparação entre imagens de radar nas projeções Slant-Range
(A) e Ground-Range (B)
Figura 2.18 - Efeitos geométricos das imagens de radar
Figura 2.19 Configuração dos taludes de uma mina a céu aberto
Figura 2.20- Exemplo de secção transversal de estrutura de maciço rochoso. 42
Figura 2.21- Ilustração dos tipos I, II e III e rupturas em ambiente de mineração
a céu aberto, em diferentes escalas
Figura 2.22 - Exemplo de ruptura sem controle estrutural em talude de
mineração a céu aberto (h = 350 m)
Figura 2.23 - Exemplo de ruptura com controle estrutural em talude de
mineração a céu aberto (h = 200 m)
Figura 2.24 – Intrumentação geotécnica para o monitoramento de taludes altos
em mineração a céu aberto
Figura 3.1 - Mapa de localização da mina N5E inserida na Província Mineral de
Carajás
Figura 3.2 - Pluviometria da estação de N5E vs períodos de recobrimento de
imagens TerraSAR-X
Figura 3.3 - Domínios geomorfológicos propostos para o estado do Pará.
Destaque para a Unidade 16 (Serra de Carajás) 53
Figura 3.4 - Divisão tectônica da Plataforma Sul-Americana
Figura 3.5 - Modelo apresentado por Santos et al. (2000) que propõe a
existência de oito províncias tectônicas, em vermelho destaca-se a
Província Carajás, na qual está inserida a área de estudo 56
Figura 3.6 Mapa geológico simplificado da Província Carajás 58
Figura 3.7 Coluna Estratigráfica das unidades pré-cambrianas da PMC 59

Figura 3.8 I	Náfica sã cisalhada	60
Figura 3.9 -	- Hematita laminar	61
Figura 3.10	- Hematita dura (HD)	61
Figura 3.11	- Canga de minério recobrindo hematita. CM – Canga de minério	е
	HM – Hematita maciça	62
Figura 3.12	- Ocorrência de dique de rocha metabásica na formação ferrífera	
	HM – Hematita maciça	62
Figura 3.13	- Mapa geológico da minha de ferro da céu aberto N5E (PMC)	63
Figura 3.14	- Estereograma representando os pólos e a máxima concentraçã	0
	do bandamento presente nas rochas da mina N5E	64
Figura 3.15	- Estereograma representando os pólos e a máxima concentraçã	0
	das superfícies de cisalhamento presentes nas rochas da mina	
	N5E	65
Figura 3.16	- Estereograma representando a orientação dos contatos present	tes
	na mina N5E	66
Figura 3.17	– Mapa litogeomecânico da mina de ferro a céu aberto N5E	
	(PMC)Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011)	69
Figura 4.1 -	- Fluxograma geral do trabalho com os dados de entrada,	
	processamentos e análises realizadas	73
Figura 4.2 -	 Mapas de deformação em superfície da mina N4E. 1) referente a 	ao
	período de monitoramento de 20/Março-10/Agosto de 2012	
	(estação seca); 2) referente ao período de 20/Março/2012 a	
	20/Abril/2013. Foram utilizadas 33 imagens TSX-1 (época seca e	;
	chuvosa)	74
Figura 4.3 -	- Fluxograma de processamento para a geração do estéreo-par	
	utilizando o software PCI-Geomatics	76
Figura 4.4-	Fluxograma do processamento da técnica DInSAR Time Series n	0
	Software GAMMA versão 20130717.	78
Figura 4.5 -	Fluxograma do processamento da técnica IPTA no Software	
	GAMMA, versão 20130717	80

Figura 4.6	- Seleção da lista de candidatos a PS na Mina 1 do Complexo do	
	Azul a partir dos critérios (A) Variabilidade temporal; (B)	
	Diversidade espectral; (C) Fusão de (A) e (B) 8	0
Figura 5.1	- Fraturas fotointerpretadas (cor amarela) e fraturas fotointerpretada	IS
	pela empresa BVP (cor verde) na cava N5E, sobrepostas a uma	
	imagem GeoEye-1 Pancromática de 01/julho/2012 8	5
Figura 5.2	- Localização do ponto de referência adotado	6
Figura 5.3	 Pares de interferogramas para o período chuvoso. Fonte: Produçã do autor	0 8
Figura 5.4	· Mapas de deformação temporal para o período chuvoso pela	
	DInSAR-TS	9
Figura 5.5	 Mapas de deformação LoS para o período chuvoso – DInSAR TS. 	
		0
Figura 5.6	 Deformação temporal para o período chuvoso sob o ponto P2 pela 	3
	DInSAR-TS.Fonte: Produção do autor 9	1
Figura 5.7	Pares de interferogramas para o período seco	2
Figura 5.7 Figura 5.8	 Pares de interferogramas para o período seco. Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco 	92
Figura 5.7 Figura 5.8	 Pares de interferogramas para o período seco)2)3
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11	 Pares de interferogramas para o período seco)2)3
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11	 Pares de interferogramas para o período seco	12 13 16
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12	 Pares de interferogramas para o período seco. Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS. Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período chuvoso sob o PS # .12215 pelo PSInSAR. 9 	13 16 17
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.13	 Pares de interferogramas para o período seco. Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS. Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período chuvoso sob o PS # .12215 pelo PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 	13 16 17 19
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.13 Figura 5.14	 Pares de interferogramas para o período seco. Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS. Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período chuvoso sob o PS # .12215 pelo PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período seco PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período seco PSInSAR. 	13 16 17 19
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.13 Figura 5.14	 Pares de interferogramas para o período seco. Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS. Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período chuvoso sob o PS # .12215 pelo PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período seco PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 9 PSInSAR. 10 	12 13 16 17 19
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.13 Figura 5.14 Figura 5.15	 Pares de interferogramas para o período seco. Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS. Mapas de deformação LoS para o período chuvoso - PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período chuvoso sob o PS # .12215 pelo PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período seco PSInSAR. 9 Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período seco PSInSAR. 9 Deformação temporal para o período seco PSInSAR. 10 Localização espacial dos sete prismas topográficos utilizados nas 	02 03 06 07 09 0
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.13 Figura 5.14 Figura 5.15	 Pares de interferogramas para o período seco	92 93 96 77 19 10
Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.13 Figura 5.14 Figura 5.15	 Pares de interferogramas para o período seco	12 13 16 17 19 10
Figura 5.74 Figura 5.11 Figura 5.12 Figura 5.12 Figura 5.14 Figura 5.15	Pares de interferogramas para o período seco	02 03 06 77 09 00 11 e

	GeoEye. A) IPTA Chuvoso; B) PSI Seco; C) DInSAR-TS Chuvoso;
	D) DInSAR-TS Seco103
Figura 5.17	 Gráficos de deformação em superfície relacionados ao prisma 02
	. A) PSI Chuvoso; B) IPTA Seco; C) DInSAR-TS Chuvoso; D)
	DInSAR-TS Seco
Figura 6.1 -	- Fraturas fotointerpretadas superpostas ao mapa litológico da cava
	N5E (BVP Engenharia 2011), com círculos realçando contatos
	litológicos por estruturas e retangulos realçando estruturas
	profundas. Imagem de fundo: GeoEye Pancromática de
	01/julho/2012111
Figura 6.2 -	- Integração dos dados do processamento DInSAR-TS para a
	estação chuvosa (A) e seca (B) juntamente com as fraturas
	fotointerpretadas e o mapa geomecânico, sobrepostas a uma
	imagem GeoEye pancromática112
Figura 6.3 -	 Integração dos dados do processamento PSI para a estação
	chuvosa (A) e seca (B) juntamente com as fraturas
	fotointerpretadas e o mapa geomecânico, sobrepostas a uma
	imagem GeoEye pancromática114
Figura 6.4 I	Localização da ausência de PS da estação Seca (A) na parte oeste
	da cava da mina N5E integrados ao mapeamento geológico,
	geomecânico e as fraturas fotointerpretadas, sobrepostas a uma
	imagem GeoEye pancromática (B)116
Figura 6.5 I	Localização do prisma 3 com os PS da estação Seca (A) integrados
	ao mapeamento geológico, sobreposto a uma imagem GeoEye
	pancromática (B)117
Figura 6.6 I	Localização do prisma 2 com os PS da estação Seca. Ao lado os
	gráficos de compração da deformação medida em campo com o
	processamento do DInSAR-TS (A) e do IPTA (B)139

LISTA DE TABELAS

<u>Pág</u>.

Tabela 2.1 - Nomenclatura das bandas de radar comumente utilizadas com
seus respectivos comprimentos de onda e frequência
Tabela 2.2 - Modos de aquisição e especificações do satélite TerraSAR-X 13
Tabela 2.3- Modos de aquisição e especificações do satélite RST-2 15
Tabela 2.4 Síntese das principais diferenças entre as três metodologias
Tabela 3.1: Definição das classes de maciços rochosos a partir do valor RMR.
Tabela 3.2: Classificação dos litotipos em relação à qualidade geomecânica. 67
Tabela 5.1 - Imagens selecionadas para o processamento do período chuvoso.
Tabela 5.2 - Imagens selecionadas para o processamento do período seco 91
Tabela 5.4 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período chuvoso.95
Tabela 5.5 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período seco 98
Tabela 5.5 – Valor de deformações de máxima subsidência e soerguimento
encontradas pelo monitoramento de campo, para a
coordenada:597277,448 mE; 9327840,373 mN105
Tabela 5.6 – Relação das amostras para a estação seca
Tabela 5.7 – Relação das amostras para a estação chuvosa106
Tabela 5.8 – Relação das amostras para toda a estação107
Tabela 5.9 – Resultado do teste de Wilcoxon para um nível de significância de
5%107
Tabela 6.1.Relação entre os pontos persistentes (PS) e classes geomecânicas
para a mina N5E115
Tabela 6.2.Desvio padrão das medidas de deformações do DInSAR-TS, ITPA e
dados topográficos de campo, para as estações chuvosa e seca.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A-DInSAR	Advanced Differential Synthetic Aperture Radar
CCSR	Canada Center for Remote Sensing
CPRM	Serviço Geológico Brasileiro
CSA	Canadian Space Agency
DLR	German Aerospace Center
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DInSAR	Differential SAR Interferometry
DInSAR TS	Differential SAR Interferometry Time-Series
DOCEGEO	Rio Doce Geologia e Mineração
EADS	European Aeronautic Defence and Space
ESA	European Space Agency
FFB	Formação Ferrífera Bandada
GCPs	Pontos de controle
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	SAR Interferometry
IPM	Índice de Produção Mineral
IPTA	Interferometric Point Target Analysis
LoS	Line-of-sight
MCF	Minimum Cost Flow
MDA	MacDonald Dettwiler and Associates Ltd.
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico de Terreno
PMC	Província Mineral de Carajás
POLIMI	Politecnico di Milano
PS	Persistent Scatterers
PSI	Persistent Scatterers interferometry
PSInSAR	Permanent Scatterer Interferometry
PSref	Persistent Scatterers de referência

RADAR	Radio Detection and Ranging
RFM	Rational Function Model
RMR	Rock Mass Rating
RPCs	Rational Polynomial Coefficients
RSM	Radar Specific Model
RST-2	Satélite RADARSAT-2
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small Baseline Subsets
SIG	Sistema de informação geográfica
SLC	Single Look Complex
SSR	Slope Stability Radar
SLAR	Side-looking Airborne Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVD	Single Value Decomposition
TRM	Toutin's 3D Radargrammetric Model
TSX-1	Satélite TerraSAR-X
UF	Ultra Fine
UTM	Universal Transverse Mercator

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
$\phi_{_{MDE}}$	Fase relativa ao Modelo Digital de Elevação
$\phi_{_{\mathcal{E}_{topo}}}$	Fase relativa ao erro de fase topográfica residual
t_1	Тетро
ϕ^{T}_{Ob}	Vetor de fase desdobrada observada
ϕ_{disp}^{T}	Vetor de deslocamentos
Α	Matriz de dimensão NxM
Dφ	Fase Diferencial
λ	Comprimento de onda
В	Linha de base
R	Distância entre alvo e sensor
d	Deformação do alvo entre duas aquisições

- Δt Intervalo de tempo
- *I*_{*i*} Imagem

SUMÁRIO

<u>Pág</u>.

1	INTRO	DDUÇÃO	1
1.1.	Objetiv	/0	4
1.1.1		Objetivos específicos	4
2	FUND	AMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1.	Senso	riamento remoto por Radar de Abertura Sintética (sar)	7
2.1.1		Geometria de imageamento	10
2.1.2		Geometria de imageamento orbital	11
2.1.3	5.	Satélite TerraSAR-X	12
2.1.4	·-	Satélite RADARSAT-2 (RST-2)	13
2.1.5	j.	Radar de Abertura Sintética (SAR)	15
2.1.5	5.1.	Princípios da Interferometria SAR (InSAR)	17
2.1.5	5.2.	Geometria InSAR	18
2.1.5	5.3.	Fase interferométrica	18
2.1.5	.4.	Coerência interferométrica	19
2.1.5	5.5.	Interferometria SAR Diferencial (DInSAR)	21
2.1.5	6.6.	Interferometria Diferencial Avançada	23
2.1.5	5.7.	Interferometria Diferencial por série temporal (DInSAR-TS)	23
2.1.5	.8.	Interferometria Diferencial por espalhadores persistentes (PSI)	26
2.1.5	.9.	A abordagem IPTA	30
2.1.6	j.	Comparação entre as técnicas interferométricas	32
2.2.	Estere	oscopia	33
2.2.1		Definições	33
2.2.2		Diferença entre estereoscopia em imagens ópticas e de radar	34
2.2.3	5.	Estereoscopia em imagens de radar	36
2.3.	2.3. Estabilidade de taludes		40
2.3.1		Definição de taludes de mineração	40
2.3.2) 	Estrutura do maciço rochoso	41
2.3.3	5.	Tipos de rupturas em taludes de mineração	43

2.3.4.	Água subterrânea	46
2.3.5.	Uso de explosivos em mineração	46
2.3.6.	Monitoramento de taludes	47
3 ÁREA	DE ESTUDO	51
3.1. Aspec	tos geológicos da mina de ferro N5E	51
3.1.1.	Localização da área	51
3.1.2.	Aspectos climáticos	52
3.1.3.	Aspectos fisiográficos	52
3.2. Provír	ncia Mineral Carajás	54
3.2.1.	Geologia regional	54
3.2.2.	Geologia local	59
3.2.2.1.	Formação Parauapebas	60
3.2.2.2.	Formação Ferrífera Carajás	60
3.2.3.	Geologia estrutural da mina N5E	64
3.2.4.	Informações litogeomecânicas	66
4 MATE	RIAL E MÉTODOS	71
4.1. Materi	ial	71
4.2. Metod	lologia	72
4.2.1.	Organização do conjunto de imagens TSX-1	73
4.2.2.	Metodologia para geração do estéreo-par	75
4.2.3.	Metodologia para a geração da dinsar time-series (DInSAR-TS).	77
4.2.4.	Metodologia para geração do IPTA	79
4.2.5.	Validação estatística	81
4.2.6.	Banco de dados	83
5 RESU	ILTADOS	85
5.1. Estere	eoscopia	85
5.2. Proce	ssamento interferométrico	86
5.2.1.	DInSAR-TS chuvoso	87
5.2.2.	DInSAR-TS seco	91
5.2.3.	PSInSAR chuvoso	95
5.2.4.	PSInSAR seco	97

5.3.	Validação dos resultados	100
6	DISCUSSÃO	109
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	141
REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1 INTRODUÇÃO

A indústria extrativa mineral brasileira é bastante diversificada, com pelo menos 55 bens minerais sendo atualmente minerados no país (DNPM, 2015). O Índice de Produção Mineral (IPM), que mede a variação na quantidade produzida, apresentou crescimento de 6,5% no segundo semestre de 2015, quando comparado a igual período do ano anterior. Este comportamento foi alcançado, sobretudo em função do aumento na quantidade de cobre, manganês e ferro, sendo que este último totalizou crescimento de 17,16%. Conforme o IBGE (2015) o setor de indústrias extrativas demonstrou crescimento de 9,4% no semestre, com destaque para o aumento da produção de minérios de ferro pelotizados (DNPM, 2015).

As operações em minas a céu aberto ocupam grandes áreas, incluindo porções de terreno adjacentes à cava da mina. Instabilidades podem ocorrer nestas áreas devido ao movimento de massas de rochas e solos, inclinação acentuada das bancadas da mina, chuvas torrenciais e outros fatores que ocorrem em operações regulares de mineração a céu aberto. Este cenário nas minas se torna pior com o passar do tempo, de acordo com Paradella et al. (2015a), em função do aprofundamento das escavações em solos e rochas do tipo saprolítico de baixa qualidade geomecânica, juntamente com as práticas de detonação e a precipitação intensa dos trópicos úmidos, com efeitos prejudiciais na estabilidade global das minas.

A instabilidade da superfície nas cavas das minas a céu aberto é uma fonte potencial de riscos para a operação e para o pessoal envolvido, podendo comprometer a produção e os custos do empreendimento. Quando esta instabilidade toma grandes proporções pode afetar não só o ambiente minerador, mas também a população que vive na região, assim como os cursos hídricos, afetando diretamente a biota regional.

Atualmente o método de monitoramento de deformação mais utilizado é através de nivelamento óptico, estação total/prismas refletivos ou GPS

(Global Positioning System) (VAZIRI et al., 2010). Este tipo de levantamento fornece informações pontuais com precisão sub milimétrica a centimétrica de áreas localizadas. De acordo com Gama et al. (2015a), com a viabilidade da utilização de dados orbitais de satélites SAR (*Synthetic Aperture Radar*) com a capacidade de se realizar a técnica da interferometria SAR (InSAR), tornou-se possível agregar mais esta ferramenta de sensoriamento remoto para o monitoramento da estabilidade superficial de minas operadas a céu aberto. Os sistemas de imagem por radar são capazes de operar em diversas condições meteorológicas, tanto durante o dia como à noite, além de fornecer uma visão sinóptica da área, conforme Ng et al. (2011). A integração de técnicas de imagem SAR, sistemas de informações geográficas (SIG) e GPS para monitorar a subsidência do solo induzida pela mineração, como ferramenta complementar aos métodos tradicionais de levantamento, foi discutida por Ge et al. (2007) e Ng et al. (2009).

De acordo Brito (2011), o elemento principal de uma mina a céu aberto é o seu talude. A geologia da jazida define a extensão e a possível profundidade que pode ter uma cava, ao passo que a Geotecnia define com que inclinação um talude pode ser escavado. Os taludes de mineração são projetados com fatores de segurança que controlem os riscos para pessoal e equipamentos frente às possíveis instabilidades. De acordo com Paradella et al. (2015a), informações litoestruturais, geomecânicas e hidrológicas são fundamentais em um projeto de operação de lavra eficiente e seguro. Todavia, a necessidade de se obter o maior ganho econômico possível na extração de minério implica em taludes finais cada vez mais íngremes, diminuindo a extração de material estéril. Deste modo, dispor de informações sobre deformação de superfície e estabilidade de taludes é um item importante na indústria de mineração, por obrigações legais, de segurança, planejamento e produção.

De acordo com Zebker e Villasenor (1992), a técnica de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) é baseada na combinação de duas imagens SAR complexas (SLC), adquiridas sobre a mesma área, com geometria de aquisição ligeiramente diferente uma da outra, para garantir que haja uma diferença de fase entre elas (interferência). A diferença de fase entre os pixels de mesma posição nas duas imagens está relacionada a quatro fatores: (1) diferença de distância entre as duas trajetórias durante as aquisições; (2) comprimento da linha-base (distância entre os sensores); (3) altura do alvo correspondente no solo; (4) comprimento de onda utilizado pelo radar. Das diversas limitações de sucesso da aplicação da técnica InSAR, a mais severa é a descorrelação temporal, que pode ser causada por qualquer mudança temporal dentro de um elemento de resolução, como crescimento ou mesmo movimento da vegetação, erosão do solo, colheita, etc. Tal efeito provoca o deslocamento não-coerente dos dispersores, alterando a fase e causando uma perda de coerência entre as aquisições (NIEVINSKI, 2004).

A técnica de interferometria diferencial SAR (DInSAR) utiliza a informação da diferença de fase entre dois pixels de mesma posição no solo, adquiridas em tempos diferentes, associando a uma deformação superficial. Porém, tal técnica só é possível em áreas com boa coerência interferométrica espacialmente distribuída (como regiões de pouca vegetação). Um dos principais fatores que podem causar baixa coerência nos pixels, podendo ocasionar a perda de informação no resultado final da técnica interferométrica, é a precipitação. Uma maneira eficaz para analisar o comportamento temporal dos fenômenos detectados é a séries temporais (DInSAR-TS), geração que nos permitem de acompanhar a evolução das deformações monitoradas. Para tanto, a informação disponível de cada par de imagens deve estar devidamente correlacionada às demais aguisições através da geração de uma sequência apropriada de interferogramas diferenciais. Estudos prévios mostram а eficiência da técnica DInSAR para monitoramento deslocamento de superfície causadas por terremotos, como mostrado por Massonnet et al. (1993) e Massonnet e Feigl (1995), e DInSAR-TS na Província Mineral Carajás por Mura et al. (2014) e Victorino et al. (2016).

Outra técnica de interferometria diferencial é de PSI (*Persistent Scatteres Interferometry*), que foi desenvolvida pelo POLIMI (Politecnico di Milano)

3

em 2000 (Ferretti et al. 2001) e patenteada pela empresa TRE. Essa abordagem visa detectar e monitorar medidas de diferenças em fase de alvos pontuais (espalhadores persistentes), caracterizados por respostas de amplitude e fase estáveis durante longo período. Segundo Paradella et al. (2015b), alvos que se comportam como PS apresentam um retroespalhamento estável, como estruturas construídas pelo homem (postes das ruas, torres de transmissão, edifícios, pontes, dutos expostos, estruturas de telhado, objetos que estão associados ao diedro, respostas de triedros) e alvos naturais (afloramentos de rochas, superfícies dos solos não vegetadas, rochedos etc.). Ferretti et al. (2000) sugerem que um conjunto mínimo de 15 imagens (*stack*) seja utilizado. Estudos atuais demonstram a eficácia desta técnica quando aplicada ao monitoramento da deformação superficial, como Pinto et al. (2015), Paradella et al. (2015), Mura et al. (2016), Ramos (2014) e Constatini et al. (2016).

1.1. Objetivo

Este estudo tem como objetivo principal a detecção de deformação em superfície da mina de ferro a céu aberto N5E localizada na Província Mineral de Carajás, caracterizada pela heterogeneidade de vegetação e área montanhosa, através de técnicas de interferometria diferencial avançada (DInSAR-TS e PSInSAR) de radar na linha da visada do satélite utilizando uma série temporal de imagens do satélite TerraSAR-X.

1.1.1. Objetivos específicos

Propõem-se os seguintes objetivos específicos, de forma a fomentar os resultados e conclusões do trabalho:

 Realizar a intepretação geológica 3D da área através da geração de estereo-par TerraSAR-X e RADARSAT-2, bem como a extração de falhas e fraturas regionais, ambos os processos no *software* PCI Geomatica, para o entendimento da orientação das estruturas da região;
- Gerar mapa de deslocamento superficial, em escala milimétrica a centimétrica, da mina N5E, através da técnica de Interferometria Diferencial por Séries Temporais (DInSAR-TS), utilizando o *software* Gamma Remote Sensing;
- Gerar mapa de deslocamento superficial, em escala milimétrica, do complexo minerário, através da técnica de Interferometria Diferencial de Pontos Persistentes (PSI), empregando a metodologia IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*) do software Gamma Remote Sensing;
- Integrar os resultados dos processamentos interferométricos com interpretação geológica a partir dos dados geológicos e geomecânicos disponibilizados pela empresa Vale S.A., utilizando o *software* ArcGIS 10.0,
- 5. Analisar quantitativamente, através de teste estatístico não paramétrico (Wilcoxon), os dados dos processamentos interferométricos e dos dados topográficos de estação total/prisma disponibilizados pela empresa Vale S.A., a fim de avaliar a similaridade entre eles.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sensoriamento remoto por Radar de Abertura Sintética (sar)

Nos últimos anos, os Radares de Abertura Sintética (SAR) têm sido importantes ferramentas para a observação terrestre por oferecerem vantagens na detecção remota. Nesse sentido, as principais vantagens são: imageamento independente de iluminação solar, geometria de iluminação controlada, operação na faixa das microondas, maior capacidade de penetração nos alvos que sensores ópticos, sensibilidade às variações da morfologia da superfície e possibilidade de uso de diferentes modos de polarização (LEWIS e HENDERSON, 1998).

O sistema de imageamento com radar de abertura sintética (SAR) opera normalmente na faixa de freguências de 0,3 GHz a 30 GHz do espectro eletromagnético (λ = 1 cm a 1m) sob praticamente gualquer condição meteorológica e de iluminação, como ilustrado na Figura 2.1. Diferentemente dos sistemas de sensoriamento remoto óptico (visível/infravermelho), que obtém, preferencialmente, imagens na posição nadir, os sistemas radares apresentam visada lateral oblígua (SLAR) e registram a informação total da radiação eletromagnética (amplitude, fase e polarização). Segundo Lewis e Henderson (1998), o radar é um sistema de imageamento ativo e coerente, que envia a intervalos regulares pulsos de microondas e registra a parcela da intensidade da radiação retroespalhada pela superfície. O funcionamento mais elementar de um sistema radar consiste da detecção e medida da distância entre o sensor e o alvo, a partir da determinação do tempo de atraso do sinal emitido. Em uma imagem SAR, o brilho (ou intensidade) de cada pixel é proporcional à potência do sinal de retorno recebido pela antena, que varia em função da interação entre os parâmetros do sistema, dos alvos e do sinal de retorno.

7

nomenclatura das bandas de radar. Comprimento de onda mm ŝ 3000 nn 300 nm E 0000 0.03 / 3 nm 3 mm 0,03 503 8 00 Áudio Rádic Rada Luv Microondas -Infravermelho TI 10¹⁸ 10¹⁶ 1020 1014 1012 1010 106 10² 108 104 Freqüência (Hz) Bandas 0,39 1,55 3,9 5,75 10,9 36 46 56 Freqüência (GHz) 0.3 30,0 100,0 1.0 3,0 10,0 Comp. de onda (cm) 100 30 3 10 1 0,3

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético no domínio de microondas com a

Fonte: Adaptado de Dallemand et al. (1993).

Como observado na Figura 2.1, a faixa espectral de microondas possui vantagens na detecção remota, uma vez que as bandas de radar apresentam faixa de frequência que possibilita a penetração nas nuvens, solos, copa de árvores e neve, como observado por Colesanti e Wasowski (2006). A rigor, guanto menor a freguência, maior é a capacidade de penetração (por exemplo, banda L). A Tabela 2.1 mostra a relação de bandas de radar com seus respectivos comprimento de onda e frequência. Sendo assim, diferentemente do visível e do infravermelho, as microondas atravessam nuvens, e são menos sensíveis ao espalhamento atmosférico que afeta os comprimentos de onda menores (ULABY et al., 1986). Esta característica é interessante, sobretudo, para regiões tropicais úmidas, como a Amazônia, onde o uso de sensores ópticos é prejudicado devido à alta ocorrência de chuvas e nuvens.

Banda	Comprimento de onda (cm)	Frequência (MHz)
UHF	136-77	220-390
Р	100-30	300-1.000
L	30-15	1.000-2.000
S	15-7,5	2.000-4.000
С	7,5-3,75	4.000-8.000
х	3,75-2,4	8.000-12.500
Ku	2,4 – 1,67	12.500-18.000
к	1,67-1,18	18.000-26.500
Ka	1,18 – 0,75	26.500-40.000

 Tabela 2.1 - Nomenclatura das bandas de radar comumente utilizadas com seus respectivos comprimentos de onda e frequência.

Fonte: Lewis e Henderson (1998).

Outra característica importante é que os sensores SAR podem emitir o feixe de micro-ondas com polarizações definidas. Fundamentalmente, а polarização se refere à orientação do campo elétrico utilizado. As antenas de um sistema SAR podem ser configuradas para transmitir e receber a radiação eletromagnética polarizada horizontal ou verticalmente (Figura 2.2). A polarização é definida como paralela guando as energias transmitida e recebida são orientadas na mesma direção. HH indica energias transmitida e recebida horizontalmente; VV energias transmitida e recebida verticalmente. A polarização é cruzada guando as energias transmitida e recebida são polarizadas na direção ortogonal (HV, VH) (RANEY, 1998). A polarização controlada oferece vantagem, pois, quando o pulso de microondas incide sobre uma superfície e é retroespalhado, a polarização pode ser modificada, de acordo com as propriedades físicas do alvo.

Figura 2.2 - Direções de propagação do campo elétrico: polarização vertical e polarização horizontal.



Fonte: Lewis e Henderson (1998).

2.1.1. Geometria de imageamento

Diferentemente dos sistemas de sensoriamento remoto óptico que, obtém imagens próximas à posição nadir, os sensores SAR apresentam visada lateral oblíqua (SLAR). A visada lateral é utilizada para evitar a ambiguidade do sinal de retorno retroespalhado a partir de alvos equidistantes à fonte de emissão da radiação (WOODHOUSE, 2006). A Figura 2.3 ilustra os principais elementos que configuram esse sistema de imageamento.





Fonte: Lewis e Henderson (1998).

A direção em azimute é a direção horizontal paralela à direção de voo da plataforma. A direção de alcance (*range*) é a direção perpendicular à

direção de voo da plataforma. O alcance inclinado (*slant range*) é a distância real sensor-alvo. A faixa de imageamento (*swath*), por sua vez, corresponde à largura total do terreno imageado. O alcance no terreno (*ground range*) é a distância sensor-alvo medida no terreno. Destaca-se que a faixa de imageamento é a distância entre o alcance próximo (*near range* - extremidade da imagem mais próxima da antena do radar ou do sinal transmitido pela antena) e o alcance distante (*far range* - extremidade da imagem mais distante do sinal transmitido pela antena). A área coberta pelo feixe da antena na superfície do terreno é a área de iluminação da antena. Finalmente, a altitude corresponde à altura da plataforma (H) (LEWIS; HENDERSON, 1998).

2.1.2. Geometria de imageamento orbital

A direção de visada é definida como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma (LEWIS; HENDERSON, 1998). Os sistemas SAR orbitais operam em órbitas ascendente ou descendente. No caso do imageamento TerraSAR-X, a direção de visada é próxima a 78° em relação à Linha do Equador em órbita ascendente, enquanto que para órbitas descendentes é próxima a 282° (Figura 2.4). A definição da geometria de visada é essencial para a extração de informações, pois alvos com orientação perpendicular à direção de iluminação são realçados, enquanto paralelos a direção de visada podem não ser detectados (WOODHOUSE, 2006).



Figura 2.4 - Direções em azimute do sistema SAR, caso do TerraSAR-X.

Fonte: Lewis e Henderson (1998).

2.1.3. Satélite TerraSAR-X

O satélite TerraSAR-X (TSX-1) foi lançado em 15 de Junho de 2007 da base de Baikonur (Cazaquistão), com uma órbita hélio-síncrona de altitude de 514 km e ciclo de revisita de 11 dias. O TSX-1 representa o primeiro projeto espacial alemão desenvolvido sob Parceria Público-Privada, entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a empresa EADS Astrium. O satélite é equipado com um radar de abertura sintética (SAR), que opera na banda-X ($\lambda = 3$ cm) e fornece imagens com elevada qualidade radiométrica e resolução espacial nominal de até 1 m, para fins variados de aplicações, tanto científicas quanto comerciais. Três são os modos de aquisição de imagens do TSX-1: *SpotLight, Stripmap* e *ScanSAR* (Fig. 2.5). A Tabela 2.2 apresenta os modos de operação do satélite e as características dos produtos para cada opção.

Modos	SpotLight(SL)	StripMap (SM)	ScanSAR (SC)
Ângulo de Incidência	20° - 55°	20° - 45°	20° - 45°
Opções de Polarização	Simples (PS):HH ou VV, Dual (PD):HH/VV	Simples (PS):HH ou VV, Dual (PD): HH/VV ou HH/HV ou VV/HV	Simples (PS): HH ou VV
Res. espacial em Azimute	2 m (PS); 4 m (PD)	3 m (PS); 6 m (PD)	16 m
Res. espacial em alcance	1,34 m (Âng. Inc. 55°); 3,21 m (Âng. 3 m (PS); 6 m (PD) Inc. 20°)		16 m
Faixa imageada	10 km	30 km (PS); 10 km (PD)	100 km

Tabela 2.2 - Modos de aquisição e especificações do satélite TerraSAR-X.



Figura 2.5- Modos de imageamento do satélite TerraSAR-X.

Fonte: http://www.infoterra.de

2.1.4. Satélite RADARSAT-2 (RST-2)

O RADARSAT-2 (RST-2) é o segundo satélite canadense de uma série de sistemas SAR, construído pela empresa *MacDonald Dettwiler and Associates Ltd.* (MDA), em parceria com a Agência Espacial Canadense (*Canadian Space Agency*– CSA). O SAR a bordo do RST-2 opera na banda C, com 5,6 cm de comprimento de onda, transmitindo e recebendo a energia em quatro orientações ou polarizações (HH, HV, VH e VV). O seu lançamento foi realizado em 14 de dezembro de 2007, na base de Baikonur (Cazaquistão), para uma órbita hélio-síncrona, com altitude de 798 km e ciclo de revisita de 24 dias. O sistema foi especificado para fornecer imagens SAR polarimétricas, além de imagens com alta resolução espacial, melhorando a capacidade de interpretação das

imagens para uma grande variedade de aplicações, em diversos modos de aquisição, como ilustrado na Figura 2.6. A Tabela 2.3 apresenta os modos de operação do satélite e as características dos produtos para cada opção.



Figura 2.6- Modos de aquisição do Satélite RADARSAT-2. Fonte: Lewis e Henderson (1998).

Fonte:<u>http://gs.mdacorporation.com/includes/images/SatelliteData/Radarsat2/RS</u> <u>AT NewBeamModes.jpg</u>

Modos	Res. Rg. × Az. (m)	Área (km²)	Ângulos de Incidência	Opções de Polarização
Spotlight	4,3 – 1,8 × 0,74	18 × 8	20° - 59°	HH ou HV ou VH ou VV (Simples)
Ultra-Fine	4,3 – 1,8 × 2,8	20 × 20	20° - 59°	
Wide Ultra-Fine	3,3 – 2 × 2,8	50 × 50	29° - 59°	
Multi-Look Fine	10,4 – 6,8 × 7,6	50 × 50	30° - 50°	
Wide Multi-Look Fine	10,4 – 6,8 × 7,6	90 × 50	29° - 50°	
Fine	10,4 – 6,8 × 7,7	50 × 50	30° - 50°	
Wide Fine	15,2 – 8,2 × 7,7	150 × 170	20° - 40°	HH ou HV ou VH ou VV
Standard	26,8 – 17,3 × 24,7	100 × 100	20° - 52°	(Simples) - ou - (HH e HV) ou (VV e VH) (Dual)
Wide	40 – 19,2 × 24,7	150 × 150	20° - 45°	
ScanSAR Narrow	79,9 – 37,7 × 60	300 × 300	20° - 46°	
ScanSAR Wide	160 – 72,1 × 100	500 × 500	20° - 49°	
Extended High	18,9 – 15,9 × 24,7	75 × 75	49° - 60°	HH
Extended Low	59,5 – 23,3 × 24,7	170 × 170	10° - 23°	(Simples)
Fine Quad-Pol	16,5 – 6,8 × 7,6	25 × 25	18° - 49°	
Wide Fine Quad-Pol	17,3 – 7,8 × 7,6	50 × 25	18° - 42°	HH, HV, VH, VV
Standard Quad- Pol	24,3 – 17,1 × 7,6	25 × 25	18° - 49°	(Quad-pol)
Wide Standard Quad-Pol	30 – 16,7 × 7,6	50 × 25	18° - 42°	

Tabela 2.3- Modos de aquisição e especificações do satélite RST-2.

2.1.5. Radar de Abertura Sintética (SAR)

A capacidade do sensor SAR em distinguir dois alvos distintos no terreno representa uma medida da qualidade das imagens de radar (quanto menor o seu valor de separação, melhor é a resolução espacial). Este é um conceito que envolve resolução espacial em duas dimensões: azimute e alcançe (*range*). Um SAR detecta energia de microondas

retroespalhada de uma célula de resolução tridimensional no espaço iluminado, descrita pelas dimensões em resoluções em azimute e *range* e pela altura limitada pelo padrão de iluminação vertical da antena. A iluminação pode ser caracterizada por frentes de pulsos monocromáticos estruturados em fase, que podem ser representados como superfícies esféricas centradas no sensor (RANEY, 1988).

Abertura Sintética é o comprimento determinado pelo deslocamento da plataforma durante o intervalo "B", como mostra a Figura 2.7. Um radar de abertura sintética (SAR) simula uma antena longa, através do deslocamento de uma antena (curta) ao longo da direção de vôo da plataforma. As posições sucessivas da antena são tratadas eletronicamente como se fossem elementos de uma única antena longa (SABINS, 1987).

Figura 2.7 – Radar de abertura Sintética, onde A representa o objeto imageado e B representa as posições ocupadas pela antena.



Fonte: Vannucci (1999).

De acordo com Vannucci (1999), os objetos são discriminados a partir das modificações na frequência dos ecos em função do movimento relativo entre os objetos no terreno e a plataforma. Assim, quando o objeto entra no feixe, os ecos tem suas frequências aumentadas (Doppler positivo), quando a plataforma está paralela à posição do objeto, não há alteração da frequência (Doppler zero). Por fim, quando a plataforma se afasta, os ecos tem uma frequência diminuída (Doppler negativo), até que o objeto saia do feixe.

A informação de frequência Doppler é obtida pela comparação eletrônica do sinal refletido pelo objeto com o sinal de referência do pulso emitido. Os dados brutos são transformados em imagem, sendo que o feixe sintético tem largura constante, fazendo com que a resolução azimutal seja constante. (GUPTA, 1991).

2.1.5.1. Princípios da Interferometria SAR (InSAR)

A interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) consiste na determinação da diferença de fase ($\Delta \phi$) de pixels homólogos entre duas imagens complexas de uma mesma área, sob condições de geometria de iluminação similares, cujo resultado é um interferograma. A fase (Φ) é uma grandeza física que representa em qual estágio do ciclo a onda se encontra em um determinado instante (t), relacionando-se com a distância da fonte emissora r_(t) (Equação 1):

$$\Phi = \frac{2 \pi r(t)}{\lambda}$$
 Eq. 1

onde λ é o comprimento de onda e a fase, por se tratar de uma medida angular, varia de 0 a 360° (ou 0 a 2 π).

Para um alvo situado a uma distância r em relação ao SAR, a fase do sinal de retorno é dado pela Equação 2, sendo o termo de 4π relacionado à distância R de ida e retorno do sinal:

$$\Phi = \frac{4 \pi r_{(t)}}{\lambda}$$
 Eq. 2

Um interferograma é um mapa bidimensional que retrata a variação de fase relativa, sendo representada por franjas de igual valor (GENS e VAN GENDEREN, 1996; MASSONNET e FEIGL, 1995). A técnica InSAR, proposta por Graham (1974) foi utilizada pela primeira vez para produzir modelos digitais de elevação (MDEs). Nesse sentido, a geração de MDEs altamente precisos a partir da informação da diferença de fase entre duas imagens, obtidas independentemente das condições climáticas, significou um grande avanço para a comunidade científica.

2.1.5.2. Geometria InSAR

Existem dois modos básicos de imageamento para geração de um interferograma: o monoestático (ou de passagem única – *Single-pass interferometry*) e o biestático (ou de passagem repetida – *Repeat-pass interferometry*). No primeiro, duas antenas são acopladas numa mesma plataforma e separadas por uma distância fixa denominada de linha-base ou baseline (B). No segundo modo, uma única antena ilumina uma mesma área em épocas distintas. O modo monoestático foi empregado no projeto *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, lançado em 2000, que visou mapear a superfície de todo o globo terrestre (RABUS et al. 2003). O modo biestático tem sido empregado com sucesso para monitorar fenômenos geomorfodinâmicos, como deslocamento de geleiras, subsidência, soerguimento, escorregamentos de encostas, entre outros (KLEES e MASSONNET, 1999). A geometria básica do imageamento InSAR está representada na Figura 2.8.

Figura 2.8- Geometria de interferometria SAR. Linha de base espacial simultânea (a) e a partir de duas passagens em diferentes momentos



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

2.1.5.3. Fase interferométrica

A radiação transmitida pelo radar atinge os espalhadores na superfície e então retornam ao sensor para formar a imagem SAR. Espalhadores em diferentes distâncias do radar introduzem um atraso entre a transmissão e a recepção da radiação. Devido à natureza quase puramente senoidal do sinal, este atraso é equivalente a uma mudança de fase entre os sinais transmitidos e recebidos. A mudança de fase é, assim, proporcional à distância dupla (ida e volta) percorrida pela onda dividida pelo

comprimento de onda transmitida (Ferretti et al., 2007). A partir de técnicas de processamento, a intensidade e a fase do sinal de retroespalhamento de cada célula de resolução do solo podem ser calculadas na forma de uma imagem de valor complexo, definido por valores de amplitude e fase (Gama et al., 2015b). A exploração da informação de fase interferométrica requer o conhecimento acerca da posição do sensor no momento das aquisições, para que seja possível reconstruir a geometria do sistema SAR naquele instante (Ramos, 2014).

A fase interferométrica está relacionada com a elevação do terreno e a imagem complexa resultante da sua diferença entre pixels análogos em duas imagens SAR é denominada interferograma. A geração do Modelo Numérico de Terreno (MNT) a partir do interferograma exige a remoção de seu padrão cíclico, cujo processo é intitulado desdobramento de fase (BAMLER; HARTL, 1998). A diferença de fase entre pixels de posições correspondentes nas duas imagens está relacionada à diferença de distância entre as duas trajetórias durante as aquisições; ao comprimento da linha de base; à altura do alvo na superfície e ao comprimento de onda do sistema sensor operante. Está ainda presente no interferograma uma componente que expressa o ruído da fase cujas fontes são: descorrelação devido à linha de base (causada por diferentes ângulos de aquisição); descorrelação temporal (ocorrente em interferometria de duas passagens); erro no registro das imagens; ruído térmico; ruído speckle e erros introduzidos pelo processamento SAR.

2.1.5.4. Coerência interferométrica

A coerência interferométrica fornece a medida da correlação de fase entre os pixels de uma imagem mestre (referência) com uma imagem escrava, adotadas no processamento interferométrico (SABATER et al., 2011). De acordo com Zebker e Villasenor (1992) e Hanssen (2001) a viabilidade da técnica InSAR depende da alta coerência interferométrica.

A imagem de coerência é calculada através do coeficiente de correlação complexo entre duas imagens interferométricas e está relacionada ao

desvio-padrão da fase interferométrica. Assim, valores de coerência altos demonstram estabilidade das fases devidas aos espalhadores, o que representa um espalhamento organizado espacialmente. A perda de coerência entre duas aquisições, denominada descorrelação, pode ser atribuída a três fatores principais: ruídos (predominantes nas situações de baixo sinal de retorno), espaço (causada pela linha de base) e tempo (ocorrente em aplicações de interferometria de duas passagens).

Imagens de coerência são facilmente interpretáveis, visto que regiões bastante iluminadas, com níveis de cinza próximos do branco, apresentam elevada correlação do par. Por outro lado, regiões escuras, com tonalidades próximas do preto, indicam regiões pouco correlacionadas, ou seja, com baixa coerência e, portanto, impróprias para aplicação de técnicas interferométricas.

Em um exemplo, um mapa de coerência da parte nordeste de Sicília (Itália) é mostrado na Figura 2.9. Áreas expostas do Monte Etna apresentam valores de coerência altos, ao passo que a vegetação aparece escura, exibindo baixos valores de coerência. Observe o valor de coerência muito baixo do mar (escuro na imagem), que muda completamente no intervalo de um dia entre as duas observações ERS.



Figura 2.9 – Mapa de coerência da região nordeste de Sicília (Itália).

Fonte: Ferreti et al. (2007).

2.1.5.5. Interferometria SAR Diferencial (DInSAR)

A técnica de interferometria diferencial SAR simples (DInSAR) utiliza a informação da diferença de fase interferométrica entre dois pixels de mesma posição no solo, adquiridas em tempos diferentes, associando a uma deformação superficial. O interferograma gerado a partir destas duas imagens tem componentes de fase devido às contribuições da topografia, deformações, atmosfera, ruídos e órbita do satélite de acordo com a equação 3:

$$\Delta \phi_{int} = \phi_{topo} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + \phi_{ruido}$$
(Eq3)

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

Conhecendo-se as posições das órbitas e a topografia da superfície, é possível subtrair a componente da fase topográfica do interferograma para medir deformações (Equação 4). Realizando este procedimento, a fase restante é devida às contribuições do deslocamento do solo entre as aquisições, juntamente com outras componentes de fase indesejáveis, representada pela equação 4. A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) referente às datas das imagens, pode-se simular a fase do terreno e então remover essa componente da fase interferométrica. No entanto, a fase do MDE (ϕ_{MDE}) incorpora um pequeno erro de fase topográfica residual ($\phi_{\varepsilon_{topo}}$), que não deve ser desprezado (Equação 5). Dessa forma tem-se:

$$D\phi_{int} = \Delta\phi_{int} - \phi_{MDE} \tag{Eq. 4}$$

$$\phi_{\varepsilon_{topo}} = \phi_{topo} - \phi_{MDE} \tag{Eq. 5}$$

$$D\phi_{int} = \phi_{def} + \phi_{\varepsilon_{topo}} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + \phi_{ruido}$$
(Eq. 6)

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

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

2.1.5.6. Interferometria Diferencial Avançada

A Interferometria Diferencial SAR aplicada sobre áreas extensas é fortemente prejudicada pela descorrelação temporal entre as imagens, principalmente aquelas em que a vegetação é predominante. A fim de contornar as limitações desta técnica tradicional, foram propostas técnicas avançadas – A-DInSAR (*Advanced* DInSAR), particularmente destacada pelas abordagens DInSAR *Time-Series* (DInSAR-TS), e Interferometria por espalhadores persistentes (PSI - *Persistent Scatterers* InSAR) (Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001). Essas abordagens são atualmente poderosos instrumentos para o monitoramento dos fenômenos de deformação da superfície, com uma precisão de centímetros ou sub-centímetro, utilizando sensores nas bandas C e X, e de alguns centímetros, para sensores na banda L (Gama et al., 2015a).

O DInSAR avançado consiste no uso de diversas aquisições SAR para a detecção e construção de séries temporais de sinais com retroespalhamento semelhante ao de alvos pontuais. Essas séries são usadas para filtrar as componentes de fase indesejáveis e modelar a movimentação do terreno.

2.1.5.7. Interferometria Diferencial por série temporal (DInSAR-TS)

Uma maneira eficaz para analisar o comportamento temporal dos fenômenos detectados é a geração de séries temporais (DInSAR-TS), que nos permitem acompanhar a evolução das deformações monitoradas. Para tanto, a informação disponível de cada par de imagens deve estar devidamente correlacionada às demais aquisições através da geração de uma sequência apropriada de interferogramas diferenciais.

De acordo com Berardino et al. (2002), com derivação de Mura et al (2015), esta abordagem considera um conjunto de *M* interferogramas diferenciais gerados a partir de um conjunto de N+1 imagens SAR,

adquiridas em ordem temporal (t0, t1, ...,tN), onde cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δ t), segundo as regras de menor intervalo de tempo entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base curtas (SBAS). Tomando-se um ponto estável como referência e um ponto genérico selecionado, os valores da fase desdobradas observados neste ponto em relação ao de referência podem ser organizados em um vetor de M elementos, segundo a equação 7:

$$\phi_{Ob}^{T} = [\phi_{\Delta t1}, \phi_{\Delta t2}, \dots, \phi_{\Delta tM}]$$
(Eq. 7)

sendo N o número de valores de fase desconhecidos, relacionados com o intervalo de deslocamento do ponto selecionado na ordem temporal (t0, t1, ...,tN), e considerando t0 como a referência temporal (deformação nula), o vetor deslocamento pode ser representado pela equação 8:

$$\phi_{disp}^{T} = [\phi_{\Delta r1}(t_1), \phi_{\Delta r2}(t_2), \dots, \phi_{\Delta rN}(t_N)]$$
(Eq. 8)

A relação entre o deslocamento e os dados observados pode ser representada como um sistema de M equações de N variáveis desconhecidas, conforme:

$$A\phi_{disp} = \phi_{Ob} \tag{Eq. 9}$$

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 pode ser obtida, no sentido de Mínimos Quadrados (LS), pela equação 10:

$$\phi_{disp} = A^+ \phi_{Ob} \tag{Eq. 10}$$

Onde $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \acute{e}$ a pseudoinversa de A.

Estudos prévios mostram a eficiência da técnica DInSAR para monitoramento deslocamento de superfície causadas por: terremotos, como mostrado por Massonnet et al. (1993; 1995); exploração de hidrocarbonetos, como demonstrado por Fielding et al. (1993). Mura et al. (2015) (Figura 2.10) e Gama et al. (2015b) (Figura 2.11) utilizaram a técnica DinSAR-TS na Província Mineral Carajás para detecção de deformações em superfícies em pilhas de estéril de minério e áreas adjacentes.



Figura 2.10- Mapa de deformação em superfície da área da mina N5W em LoS.



Figura 2.11- Mapa de deformação em superfície utilizando técnica DInSAR-TS do Complexo Minerador de Carajás/Pará/Brasil. O vermelho é o máximo afastamento do sensor, ao passo que o azul é a máxima aproximação do sensor.



2.1.5.8. Interferometria Diferencial por espalhadores persistentes (PSI)

Interferometria por Espalhadores Persistentes (PSInSAR) А foi originalmente desenvolvida no Instituto Politécnico de Milão - POLIMI (Itália) com o nome de PSInSAR (Persistent Scatteres Interferometry Synthetic Aperture Radar). Formulada inicialmente por Ferretti et al. (1999, 2000), tal técnica possibilitou o avanco da interferometria tradicional a partir da possibilidade de gerar interferogramas de zonas urbanas e com presença de vegetação densa, mas com valores de coerência adequados. Consequentemente, permitiu construir MDEs com maior exatidão vertical e detectar movimentos na superfície terrestre com uma precisão milimétrica (Ferretti et al., 2001).

A PSI baseia-se em uma série de interferogramas diferenciais, nos quais se busca identificar espalhadores cujas propriedades de dispersão variam pouco com o tempo e ângulo de visada, o que permite uma análise temporal da fase interferométrica de pontos individuais e fornece uma informação precisa relacionada a deslocamento da superfície destes pontos. Estes alvos de elevada coerência (PSs), ao serem identificados em múltiplos interferogramas permitem minimizar os problemas relativos ao desdobramento de fase, bem como uma melhor discretização dos compõem fase diversos componentes que а interferométrica, possibilitando a estimação e remoção de erros orbitais, efeitos da topografia, da atmosfera e a estimativa da fase relacionada à deformação e seus diferentes comportamentos no tempo e no espaço (Ferretti et al., 2001; Wegmuller et al., 2004). A Figura 2.12 apresenta exemplos típicos de espalhadores persistentes.

Figura 2.12 Ilustração do comportamento da fase para (a) pixel com espalhadores distribuídos e (b) pixel com espalhadores coerentes (persistentes).



A técnica PSI utiliza um número mínimo de 15 imagens registradas temporalmente (Ferreti et al., 2001), para que seja possível realizar uma análise estatística dos erros de fase relacionados à atmosfera e ruídos. Além disso, o procedimento de análise e modelamento em PSI permite a obtenção de informações relacionadas à serie temporal de deformação, à taxa de deslocamento médio durante o intervalo de aquisição das imagens e ao erro residual topográfico.

No processamento PSI selecionam-se inicialmente 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 amplitude na série temporal.

A combinação dos dados para formar o conjunto de imagens interferométricas (*stack*) é realizada inicialmente pela escolha de uma imagem mestre, que, por exemplo, pode estar no centro da série temporal para que a coerência interferométrica seja maximizada. A Figura 2.13 ilustra a configuração típica de um conjunto de imagens utilizadas na metodologia PSI, onde N imagens adquiridas sequencialmente no tempo são primeiramente corregistradas. Posteriormente, é selecionada a

imagem de referência (Mestre), baseada no critério de menor dispersão de linha de base e proximidade do centro do intervalo de aquisição. Um ponto de referência é escolhido na imagem (PSref), com a propriedade de ser um PS estável (não ocorre deformação no intervalo da série temporal de imagens) na área de estudo.



Figura 2.13 Ilustração dos componentes de fase de um ponto de retorno persistente.

Fonte: Paradella et al. (2015a)

Para um PSj genérico, as fases relacionadas à imagem de referência correspondente aos M interferogramas (M=N-1) e ao PS de referência (PSref) são combinadas, para formar o vetor de fase diferencial D Φ . Cada um dos *M* componentes do vetor de fase diferencial pode ser desmembrado como a somatória das contribuições relacionadas à deformação do ponto PSj (Φ def), a fase devido a erro no modelo digital de elevação neste ponto (Φ eh), a fase introduzida pela atmosfera (Φ atm) e a fase devido a ruídos (Φ ruído), formando um sistema de M equações, representado pela equação 11:

O objetivo da técnica PSI é separar os componentes de fase referente à deformação, vetor φdef, dos outros componentes do vetor de fase diferencial Dφ. Para tratar este problema, tal técnica faz uso de modelagem e análises apropriadas dos dados, realizando um tratamento estatístico das observações (conjunto de imagens) disponíveis, para a estimativa dos diferentes parâmetros do modelo.

Modelando apropriadamente a componente de fase devido à deformação do terreno, é possível estimar a evolução de uma deformação espacialmente e temporalmente. Isto permite uma visão sinóptica do fenômeno deformacional ocorrendo regionalmente, com a capacidade de medir mudanças em feições individuais, como estruturas e construções. Uma vantagem importante é sua sensibilidade a pequenas deformações na superfície, com acurácia milimétrica na linha de visada do SAR (0,1 - 1 mm de taxa de deformação média e 1 - 3,5 mm para medida individual). A terceira vantagem é a amostragem temporal do fenômeno, função da revisita do sistema sensor usado.

Outro fator importante está relacionado à capacidade de medir deformações ao longo da linha de visada do sensor (*Line of Sight* - LoS). Deste modo, não é possível detectar deslocamentos puros na direção vertical ou horizontal, mas somente movimentos ao longo da linha de visada do radar, sejam para órbitas ascendentes ou descendentes. Uma maneira de se obter deslocamento na direção vertical e horizontal é através do uso combinado de aquisições em órbitas ascendentes e descendentes. Finalmente, devido à natureza ambígua da fase, que varia de 0 a 2π , a técnica PSI sofre limitações na capacidade de medir

fenômenos rápidos de deformação, maiores que $\lambda/4$, entre as aquisições. O potencial para o monitoramento de deformação não uniforme melhora com uso de sensores com elevadas resoluções espacial e temporal.

2.1.5.9. <u>A abordagem IPTA</u>

A abordagem IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*) é utilizada para estimar o vetor deformação (φdef) de cada ponto PS, representado na equação Eq.9. Consiste em explorar algumas características dos componentes de fase, visando à separação ou atenuação de cada uma delas. A Figura 2.14 ilustra as várias etapas do processamento utilizados na metodologia IPTA para estimar a deformação de cada PS (WEGMULLER, et al. 2010).



Figura 2.14 Ilustração a modelagem de processamento da técnica IPTA.

Fonte: Paradella et al. (2015a)

A técnica IPTA é baseada em uma regressão linear bidimensional (2D) dos dados relacionados à fase diferencial de cada PS, como ilustrado na Figura 2.14. Primeiramente, é realizado o desdobramento de fase no sentido temporal; em seguida, é explorada uma característica importante da fase relacionada ao erro do modelo de elevação, a sua dependência linear com a linha de base normal das várias aquisições. A segunda regressão linear do modelo 2D é referente à deformação, que é assumida ser linear no tempo. Os resíduos desta regressão linear estão

relacionados aos componentes de fase da atmosfera, ruído e uma possível componente relacionada à deformação não linear do ponto PS.

A atenuação da fase relativa à atmosfera é realizada através de filtros que levam em conta a característica deste componente de fase ser altamente correlacionado espacialmente na extensão da imagem e totalmente descorrelacionado 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 as baixas frequências serão utilizadas. Com os dois componentes de fase dos resíduos atenuados, restarão os componentes de fase devido à deformação não linear. Ao final do processamento, os componentes de fase linear (determinada pela regressão linear) e a não linear são adicionados, fornecendo o componente de fase estimada pela técnica IPTA. Nesta técnica, a regressão 2D pode ser realizada de modo interativo, ou seja, à medida que se descobre a fase do erro do modelo de elevação e a fase do componente de deformação linear, estas podem ser corrigidas, resultando em uma fase interferométrica diferencial residual que pode ser novamente processada com a regressão 2D. Esta interação pode ser realizada quantas vezes forem necessárias.

Nos últimos anos, a Interferometria Diferencial por Espalhadores Persistentes (PSI) está sendo utilizada com sucesso por diversos pesquisadores na detecção e no monitoramento de deformações superficiais em ambiente de mineração, principalmente em minas a céu aberto. Por basearem-se em uma série temporal de imagem SAR, os mapas de deformação fornecem resultados concordantes com as medidas obtidas por instrumentação geotécnica *in situ* (HERRERA et al., 2010; PARADELLA et al., 2015b). Exemplos de aplicações da técnica PSI em ambiente de mineração podem ser vistos em Ng et al. (2009), Guéguen et al. (2009), Paradella et al. (2015c) e Mura et al. (2016).

O trabalho de Pinto et al. (2015) mostra que tal técnica foi bem sucedida para estudos de deformação em superfície na mesma região de estudo, localizada na mina Azul (Província Mineral de Carajás) e na pilha de

31

rejeitos, como ilustrado na Figura 2.15. Os autores dividiram o seu conjunto de imagens em dois períodos, seco e chuvoso, a fim de observar a influência da pluviosidade no resultado da técnica.

Figura 2.15 Distribuição espacial de pontos persistentes (PS) para mina e uma pilha de rejeito, visualizadas pela linha de visada (LOS). Ao fundo imagem pancromática GeoEye-1. Cenário para estações seca e chuvosa.



Fonte: Pinto et al. (2015).

2.1.6. Comparação entre as técnicas interferométricas

As abordagens DInSAR Simples, DInSAR-TS e PSI apresentam algumas diferenças básicas que serão descritas a seguir e são apresentadas na Tabela 2.4.

As técnicas DInSAR Simples e DInSAR-TS usam dados "*multi-look*", ou seja, com resolução espacial reduzida, bem como apenas em áreas com boa coerência interferométrica. Já a técnica PSI utiliza o critério da estabilidade da amplitude dos PS para a seleção do pixel (FERRETTI et al., 2000). Nesse caso, a vantagem é que os PS são constantes ao longo do tempo e consequentemente pouco afetados pela descorrelação (WEGMULLER et al., 2004).

O segundo aspecto é em relação ao número mínimo de imagens SAR. Na abordagem DInSAR Simples, é necessário apenas um par de imagens SAR. Já para as outras duas técnicas, utiliza-se uma série temporal de imagens corregistradas. Essa característica é essencial para adquirir o comportamento da deformação ao longo do tempo (série temporal), o que as torna comparáveis com técnicas gedésicas tradicionais (CROSSETTO et al., 2005).

Técnica	Principais Características
DInSAR	Interferometria com MDE removido
	mormação qualitativa
	E afetada por efeitos atmosfericos, erros do MDE e ruidos de fase
	Não fornece uma série temporal
	Precisão métrica
DInSARTS	Explora espalhadores permanentes (PS)
	Estima e remove efeitos atmosféricos
	Estima e remove erros do MDE
	Fornece uma série temporal
	Necessita de pelo menos 8 imagens
	Precisão centimétrica
PSI	Explora alvos terrestres estáveis (PS)
	Estima efeitos atmosféricos e a sua remoção
	Estima e remove erros do MDE
	Provê uma série temporal
	Necessita de pelo menos 15 imagens
	Precisão milimétrica

Tabela 2.4 Síntese das principais diferenças entre as três metodologias.

Fonte: Paradella et al. (2013).

2.2. Estereoscopia

2.2.1. Definições

De acordo com Oliveira (2011), a maneira mais intuitiva para extrair a informação de profundidade das imagens de sensoriamento remoto é a estereogrametria, na qual a posição no espaço 3D é obtida por meio de imagens estereoscópicas de radar. Quando apenas a amplitude das imagens de radar é considerada, a técnica é chamada de Radargrametria (MÉRIC et al., 2011).

Segundo Polidori (2001), a Radargrametria é uma adaptação dos princípios fotogramétricos para o caso de imagens de radar, baseada nas medidas da paralaxe entre duas imagens adquiridas de diferentes pontos. Por sua vez, a estereoscopia permite obter dados tridimensionais, através da observação de um par de imagens planas (pares estereoscópicos) obtidas de uma mesma cena, com ângulos de incidência distintos (Santos et al., 1999). Em qualquer tipo de imageamento, a estereoscopia depende fundamentalmente de dois indicadores fotogramétricos (Santos et al., 1999):

- A paralaxe estereoscópica horizontal, que busca reproduzir a disparidade binocular da visão humana, e que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de objetos, quando vistos de diferentes lugares;
- O ângulo de interseção estereoscópica, que busca reproduzir a convergência da visão humana e é medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto no terreno, nas duas cenas do par. Em um mesmo par estereoscópico, a paralaxe e o ângulo de interseção estereoscópica são diretamente proporcionais à elevação do ponto observado.

2.2.2. Diferença entre estereoscopia em imagens ópticas e de radar

Segundo Oliveira (2011), а visão estereoscópica tem papéis fundamentalmente diferentes nos sensores ópticos e no radar. Nos sistemas ópticos, as alterações de geometria, que resultam na paralaxe necessária à visão tridimensional, não implicam em mudanças significativas na iluminação das cenas. Por outro lado, o radar imageador tem sua própria fonte de iluminação, o que significa que, quanto maiores forem as diferenças geométricas entre as cenas do par (obtidas através de alterações da geometria de visada), maiores serão as diferenças radiométricas entre elas. Ao contrário do que acontece com sensores ópticos, no radar imageador a visão estereoscópica depende do equilíbrio entre as diferenças geométricas e as similaridades radiométricas das cenas do par (Santos et al., 1999).

No caso do radar, o par de imagens estereoscópicas depende da posição do sensor e do sentido da órbita (ascendente ou descendente). As combinações possíveis são: imagens de mesmo sentido da órbita e de sentidos opostos, podendo variar o ângulo de incidência das imagens (Figura 2.16). A estereoscopia de radar com imagens adquiridas em órbitas de mesmo sentido privilegia a correlação radiométrica entre as duas cenas do par. Ao passo que, com imagens de órbitas em sentidos opostos, realça a disparidade geométrica entre as cenas (melhor paralaxe). Portanto, é necessário um compromisso entre aspectos de disparidades geométricas e radiométricas na escolha do melhor par de imagens SAR para a geração de um MDE radargramétrico (PARADELLA, 2015a).

Figura 2.16 - Imageamento no mesmo sentido da órbita e em sentidos opostos, podendo variar o ângulo de incidência das imagens.



Fonte: Adaptado de Paradella (2015b).

2.2.3. Estereoscopia em imagens de radar

O início das aplicações de métodos estereoscópicos com sensores SAR foi realizado na década de 1960, levando ao desenvolvimento da radargrametria. A partir de 1980, melhorias nos sistemas SAR mostraram a possibilidade da obtenção de estereoscopia com imagens SAR obtidas de órbitas de mesmo sentido ou sentidos opostos (Leberl, 1998).

Nas últimas décadas, duas modelagens matemáticas têm sido utilizadas para orientação e posicionamento de sensores orbitais: modelos matemáticos rigorosos (ou modelos físicos) e modelos matemáticos não rigorosos (modelos empíricos). Geralmente, os modelos rigorosos são mais acurados que os modelos empíricos, pois consideram todas as informações do sensor, assim como dos movimentos do satélite e da Terra. Entretanto, a grande vantagem de simplificar a relação entre os espaços imagem e objeto, usando os modelos matemáticos empíricos, é que um conjunto de equações pode ser usado diretamente para aplicação das diferentes imagens de diferentes sensores (SHAKER, 2008).

O modelo matemático empírico *Rational Function Model (RFM)* é baseado na razão de funções polinomiais para calcular as posições das linhas e colunas da imagem a partir da utilização de pontos de controle (GCPs) ou de dados auxiliares (*Rational Polynomial Coefficients*- RPCs) fornecidos com as imagens. É um modelo sensor generalizado, utilizado como uma alternativa aos modelos matemáticos rigorosos e faz pleno uso dos parâmetros auxiliares das imagens de satélite. Nesta modelagem, as coordenadas dos pixels da imagem são expressas como a razão entre duas funções de polinômios das coordenadas do terreno (Latitude, Longitude, Altitude) (Zhang et al., 2010).

Dois exemplos de modelos matemáticos rigorosos são: *Radar Specific Model (RSM) e Toutin's 3D Radargrammetric Model (TRM).* O primeiro utiliza parâmetros orbitais adicionais para diminuir a quantidade de pontos de controle (GCPs) necessários para ajustar o modelo e extrair as distâncias em alcance (*slant-range*) da antena/terreno. A altimetria é

36

estimada através de soluções que satisfaçam a geometria definida pelas duas posições em estéreo do sensor, permitindo o cálculo da interseção em 3-D das duas imagens e a determinação das posições planialtimétricas (x, y, z). Os parâmetros extras mantêm a acurácia posicional e o alto nível de detalhe do modelo, mas os GCPs podem ser reduzidos a poucos ou a nenhum (PARADELLA et al., 2015c).

Segundo os mesmos autores, o modelo TRM, desenvolvido por *Thierry Toutin do* CCRS (*Canada Center for Remote Sensing*), reflete a geometria de visada e as distorções geradas durante a formação da imagem, como as causadas pela plataforma (posição, velocidade e orientação), pelo sensor (orientação, tempo de integração e campo de visada), e pela Terra (Geóide, Elipsóide e relevo). O princípio básico deste modelo estabelece que um ponto no espaço-objeto, o seu correspondente no espaçoimagem e o Centro Perspectivo são colineares no instante da tomada da imagem. As equações deste modelo são resolvidas com a inclusão de poucos pontos de controle e a sua acurácia para imagens SAR é de aproximadamente 1 pixel, quando são usados GCPs adequados.

Com relação à geometria de aquisição das imagens, há aspectos na geometria de iluminação do radar que produzem efeitos de deslocamento do relevo, diferentes daqueles observados nos sistemas ópticos e de importância fundamental para o entendimento da estereoscopia de radar.

Paradella et al. (2003) relatam que, nas imagens SAR, as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor e as linhas de projeção que conectam pontos no terreno com pontos na imagem de radar seguem círculos concêntricos em relação à localização da antena.

Nas imagens de radar, os deslocamentos devido ao relevo são maiores na projeção *slant-range*, distância entre o sensor e o alvo no terreno, do que na projeção *ground-range*, distância entre a projeção da plataforma no terreno e o alvo. A Figura 2.17 apresenta as projeções *slant-range*, *ground-range* e a comparação entre imagens nas duas projeções.

37



Figura 2.17 - Comparação entre imagens de radar nas projeções *Slant-Range* (A) e *Ground-Range* (B).

Fonte: Adaptada de CCRS (2001).

Algumas distorções geométricas típicas no imageamento de radar são o *foreshortening* (encurtamento de rampa), *layover* (inversão de relevo) e sombreamento (Leberl, 1998). A Figura 2.18 apresenta as situações onde podem ocorrer tais distorções.



Figura 2.18 - Efeitos geométricos das imagens de radar.

Fonte: Adaptada de Leberl (1998).

Os efeitos de relevo apresentados acima são de grande importância em uma imagem de radar e, conseqüentemente, na composição de pares estereoscópicos. Deve-se observar que, especialmente em terreno montanhoso, quanto menor for o ângulo de incidência da iluminação de radar (observação mais verticalizada), maiores serão os efeitos de *foreshortening* e *layover* (Paradella et al., 2003).

Ângulos de incidência maiores minimizam esses efeitos, porém, aumentam as áreas com sombras de radar, que representam perda de informação. Há ainda que se considerar o efeito da micro-topografia (rugosidade superficial na escala do comprimento de onda), como modulador do sinal retroespalhado. Neste sentido, maior será o efeito da rugosidade superficial no retroespalhamento do sinal de radar, quanto menor for o ângulo de incidência (Paradella et al., 2003).

2.3. Estabilidade de taludes

2.3.1. Definição de taludes de mineração

De acordo com Stacey e Read (2009), para uma mina a céu aberto, a construção do talude é um dos maiores desafios de todos os passos do planejamento da operação. Isso requer conhecimento especializado de geologia, que é frequentemente complexo na vizinhança do corpo do minério, onde estruturas geológicas e/ou alterações podem ser fatores chaves, além das propriedades do material, que são altamente variáveis. É também necessário conhecimento dos aspectos práticos da implementação da construção do talude.

O objetivo de qualquer projeto de mina a céu aberto é proporcionar uma configuração de escavação com máxima segurança e retorno econômico. A geometria de configuração da cava em uma mina a céu aberto vai depender da distribuição espacial do corpo de minério e das características geomecânicas do maciço rochoso. Na figura 2.19, são apresentados os constituintes da configuração de uma mina a céu aberto, que incluem os taludes de bancada, taludes inter-rampa, talude global, rampas, além das três grandezas angulares de inclinações usadas da lavra, que são os ângulos de talude global, ângulos de face e ângulos descrito por Huallanca (2004). inter-rampas, como Pequenas modificações no ângulo dos taludes podem implicar em uma diferença de milhões de toneladas na quantidade de estéril a ser removido, com grandes reflexos em custos. Contudo, cavas profundas implicam em grande potencial para problemas de estabilidades de taludes que precisam ser acomodados.

40


Figura 2.19 Configuração dos taludes de uma mina a céu aberto.

Fonte: Huallanca (2004).

2.3.2. Estrutura do macico rochoso

Mesmo quando muito bem projetados e construídos, taludes podem se romper devido a causas variadas (uma estrutura geológica não mapeada ou mal caracterizada previamente, condições de precipitação intensa, atividades de explosivos ou por operação da lavra). A estrutura do maciço rochoso é um dos fatores mais importantes que governa a estabilidade do talude (HUALLANCA, 2004). As distribuições dos diferentes tipos de rocha e as suas descontinuidades formam o maciço rochoso. A Figura 2.20 apresenta uma secção típica, proposta por Huallanca (2004), que é atravessada por diferentes descontinuidades, tais como falhas e sistemas de juntas. Além disso, podem ocorrer vários tipos de litologias com diferentes graus de faturamento.



Figura 2.<u>1</u>20- Exemplo de secção transversal de estrutura de maciço rochoso.

Fonte: Huallanca (2004).

Uma das consequências do processo de lavra é a produção de muito material estéril, constituído pelos produtos resultantes do decapeamento do depósito (solos e rochas de natureza diversa, com diferentes granulometrias, densidades e resistência), escavados e removidos de forma a permitir o acesso aos corpos de minério (STACEY; READ, 2009). O material é transportado por caminhões e/ou correias transportadoras e disposto em pilhas de disposição de estéril. As instabilidades normalmente relacionadas às pilhas de estéril estão relacionadas aos recalques e rupturas.

Porém, é na cava que predominam as maiores condições de instabilidades que acarretam prejuízos diretos na segurança operacional da mina. A estabilidade de taludes em mineração é complexa devido à dinâmica da escavação, ao porte da mina, às condições peculiares da exploração, rebaixamento do nível de água, etc. Ou seja, já é esperado que em mineração ocorram instabilidades, desde que os riscos sejam controláveis. Em função disso, há uma maior preocupação com o monitoramento, que atualmente é feito sobretudo pontualmente, com o objetivo de determinar posições absolutas e mudanças posicionais de qualquer ponto da superfície com uma variedade de instrumentos, como estações totais, teodolitos, GPS, entre outros.

2.3.3. Tipos de rupturas em taludes de mineração

De acordo com Brito (2011), todos os taludes se deformam, muitos sofrem trincas e rachaduras, porém poucos rompem. Segundo sugerido pelo mesmo autor, as deformações em taludes podem ser classificadas como (1) descarregamento (detectado por instrumentos, não visível, linear, que não leva necessariamente a uma ruptura), (2) movimento (indica as primeiras evidências de instabilidade pela presença de trincas e estufamento do pé), que pode ser controlado por monitoramento e evoluir para ruptura, (3) ruptura (o deslocamento atinge um valor que não é seguro trabalhar ou operar nele), (4) colapso e (5) queda de rochas (fragmentos ou blocos de rochas se desprendem do talude e caem nas partes inferiores, podendo ser indicativo de movimentos maiores). Além disso, Brito (2011) também classifica os maciços como: brandos (aqueles que se rompem pela matriz e incluem os solos), estruturados (se rompem pelas descontinuidades representadas principalmente por fraturas e falhas) e mistos (brandos + estruturados). No caso de maciços brandos, a estabilidade de talude é influenciada pela resistência do material (que é diferente para cada tipo de rocha) e pela presença de água, ao passo que em maciços estruturados, a estruturação geral (fraturas e falhas) e os efeitos de detonação, com pouca influência de água são os fatores mais importantes.

Segundo Deeree e Patton (1971), conforme a geometria da ruptura e a altura dos taludes de mineração a céu aberto, e, adicionalmente, o grau de fraturamento do maciço rochoso, as rupturas podem abranger uma determinada escala. Tais rupturas foram divididas em três tipos, conforme a Figura 2.21:

- (a) Rupturas locais (Tipo I) ocorrem em nível de bancada, controladas por juntas e falhas dessas mesmas magnitudes;
- (b) Rupturas de maior escala (Tipo II), controladas por descontinuidades persistentes, tais como sistemas de juntas combinadas com falhas. Podem ocorrer de acordo com a

43

configuração geométrica das descontinuidades pré-existentes em relação ao talude;

- (c) Rupturas em rochas fraturadas (Tipo III), associadas ao alto fraturamento típico de rochas alteradas que influenciam a estabilidade devido a sua baixa resistência e qualidade geomecânica.
- Figura 2.21- Ilustração dos tipos I, II e III e rupturas em ambiente de mineração a céu aberto, em diferentes escalas.



Fonte: Adaptado de Deere e Patton (1971).

Como exemplo de ruptura de grande porte em mineração a céu aberto, uma ruptura de aproximadamente 350 m de altura em um talude de aproximadamente 600m. O maciço rochoso envolvido nesta ruptura é alterado e fraturado. A superfície de ruptura, segundo HOEK et al. (2000), passa pelo maciço rochoso fraturado e alterado, enfraquecido pela presença de juntas, ou que estaria governada por algum tipo de controle estrutural (Figura 2.22).

Figura 2.22 - Exemplo de ruptura sem controle estrutural em talude de mineração a céu aberto (h = 350 m).



Fonte: Hoek et al. (2000).

Como exemplo de ruptura com controle estrutural, tipo II em mineração a céu aberto, tem-se uma ruptura de aproximadamente 200 m de altura (Figura 2.23). O maciço rochoso envolvido nesta ruptura possui alto grau de faturamento e alteração. O exemplo deste tipo de ruptura de mina é apresentado na Figura 2.23, localizada na Província Mineral Carajás (PMC).



Figura 2.23 - Exemplo de ruptura com controle estrutural em talude de mineração a céu aberto (h = 200 m).

Fonte: Produção do autor.

2.3.4. Água subterrânea

Outro fator não menos importante, que exerce influência na estabilidade de taludes de escavação, especialmente em regiões tropicais úmidas, é a água subterrânea (AZEVEDO e FILHO, 1998). A água das chuvas, ao se acumular no maciço rochoso, leva a uma diminuição da coesão e pode gerar pressões neutras, que favorecem a ruptura. Uma forma de minimizar o efeito da água subterrânea é por meio da instalação de dispositivos de drenagem, como canaletas superficiais, drenos horizontais, poços de bombeamento, galerias de drenagem, etc. (ATKINSON, 2000).

Um efeito secundário da água subterrânea é que determinados minerais, como os argilo-minerais secundários (e.g. ilita e montmorilonita) presentes nos solos, reagem desfavoravelmente em água. Especialmente os solos com grandes quantidades de montmorilonita tendem a ser mais instáveis em presença de água. Apresentam em geral grande resistência quando secos, perdendo quase totalmente a sua capacidade de suporte por saturação. Sob variações de umidade, apresentam grandes variações volumétricas, retraindo-se em processos de secagem e expandindo em meio aquoso.

2.3.5. Uso de explosivos em mineração

Além de todos esses fatores naturais, que podem ser intensificados pelo homem, um fator estritamente antrópico que afeta a estabilidade de taludes em mineração é o uso de explosivos como método de lavra, que sempre ocasiona algum dano ao maciço, resultando na perda de resistência. Tal procedimento pode alcançar grandes distâncias da face do talude, o que nem sempre pode ser verificado nos mapeamentos geomecânicos (HOEK et al. 2000). Métodos de escavação com o controle da quantidade de explosivos por espera, o pré-fissuramento e a detonação amortecida minimizam substancialmente estes danos. No entanto, nenhum modelo para determinação dos parâmetros de resistência de maciços rochosos incorpora as correções devidas aos danos provocados por explosivos.

Huallanca (2004) descreve que o uso continuado de explosivos para o desmonte do minério provoca danos progressivos no maciço, modificando seus parâmetros de resistência, podendo culminar em rupturas.

2.3.6. Monitoramento de taludes

Segundo Tofani et al. (2013), para prever e minimizar os danos (materiais, econômicos e sociais), são empregadas técnicas de monitoramento geotécnico. Tais técnicas são fundamentais para a operação da mina, pois fornecem resultados precisos e com alta resolução temporal. A instrumentação geotécnica pode estar localizada em superfície e sub-superfície (VAZIRI et al., 2010).

Medidas em pontos discretos por levantamentos são de uso mais amplo no monitoramento de taludes em minas a céu aberto, particularmente através do uso de estação total e rede de prismas refletores. As suas vantagens são que fornecem resultados em tempo real, de elevada resolução temporal (depende da frequência das medidas), elevada precisão (submilimétrica a centimétrica). Como desvantagens, devem ser mencionadas a necessidade de visibilidade entre estação e os prismas, além da presença de ruídos nos dados originais. Porém, a maior limitação é a impossibilidade de fornecer informações espaciais requeridas no monitoramento de áreas extensas. Nesta situação, os custos e o tempo de medições envolvidas tendem a não ser economicamente viáveis (DEHLS, 2006).

Atualmente, há diversos equipamentos de monitoramento de superfície em mineração a céu aberto; um dos mais utilizados é o Radar de Estabilidade de Inclinação (*Slope Stability Radar-* SSR). De acordo com Nader (2013), o sistema consiste em um radar interferométrico com base no solo, projetado para detectar os movimentos precursores de falhas em taludes de minas a céu aberto, estradas e barragens.

47

O SSR é utilizado em minas a céu aberto como um mecanismo de segurança para medir os movimentos de um maciço antes do colapso. O sistema fornece medições contínuas submilimétricas de movimentos de maciços em toda a face de um talude. A varredura não exige contato com o talude, sendo assim capaz de monitorar área de difícil acesso, em minas que utilizam explosivos para detonação. O processo de varredura é repetido a partir da base de um talude até o topo e os dados são coletados para cada exame. O valor de deformação final é análogo ao da técnica interferométrica de imagens SAR, ou seja, a deformação final é calculada a partir da diferença de fase entre as aquisições dos dados. Tais dados podem ser expressos em "mapas de calor" da deformação da área digitalizada em *softwares* específicos e em informações quantitativas da deformação, apresentadas em gráficos que mostram a deformação na escala do tempo da série temporal utilizada (Read e Stacey, 2009).

Outro método de monitoramento de taludes e mineração é por medidas topográficas usando estação total e prismas refletivos, que é uma das técnicas de monitoramento geotécnico de taludes mais usuais e confiáveis em engenharia civil e mineração. Essa técnica possibilita monitorar deslocamentos superficiais horizontais e verticais, com a precisão de alguns milímetros. Segundo a empresa Vale S.A., a precisão das medidas dos prismas usados neste trabalho é de ± 2 milímetros (1 σ).

As redes de prismas (ou estações defletoras) são comumente utilizadas para se monitorar os deslocamentos superficiais do maciço, por meio de levantamentos topográficos utilizando-se uma base com estação total, como pode ser observado na Figura 2.24. Esta base deve estar localizada sobre terreno estável, ao mesmo tempo em que deve estar suficientemente perto da crista do talude para que os prismas possam ser visualizados. Por outro lado, pontos de referência são necessários com a finalidade de monitorar a estabilidade da estação base.

48



Figura 2.24 – Intrumentação geotécnica para o monitoramento de taludes altos em mineração a céu aberto.

Fonte: Adaptado de Huallanca (2004).

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1. Aspectos geológicos da mina de ferro N5E

3.1.1. Localização da área

A Mina N5E está inserida na Província Mineral de Carajás (PMC), no município de Parauapebas, no Pará. A PMC é a província mineral mais importante do Brasil e engloba um dos maiores depósitos de ferro do mundo e está localizada na fronteira oriental da Amazônia, pertencendo à empresa de mineração Vale S.A. A exploração em Carajás é realizada utilizando o estado da arte em bancadas de minas a céu aberto. As atividades de mineração atuais estão relacionadas com dois corpos de minério de ferro (N4 e N5), conforme a Figura 3.1.





Fonte: Produção do autor.

3.1.2. Aspectos climáticos

Na região amazônica, o clima dominante é tropical, quente e úmido, com temperatura média anual de 26°C e taxa pluviométrica média de 1600 mm/ano.

A Figura 3.2 mostra os dados mensais de pluviometria da Estação Meteorológica da Mina N5E, no período de aquisição das imagens TSX-1 (março/2012 a abril/2013). Os dados pluviométricos indicam que nesse período o total de chuva acumulado foi de 3149,5 mm. O período de seca se estende do final de março até começo de outubro, sendo os meses de agosto e setembro praticamente secos, com taxas pluviométricas em torno de 50 mm. Por outro lado, os meses mais chuvosos foram janeiro (333 mm) e março de 2013 (288,5 mm).

Figura 3.2 - Pluviometria da estação de N5E vs períodos de recobrimento de imagens TerraSAR-X.



Períodos sem Imageamento TSX

Fonte: Produção do autor.

3.1.3. Aspectos fisiográficos

A PMC apresenta uma área de 120.000 km² e é caracterizada por um conjunto de colinas e planaltos (altitudes 500 a 900 m), cercada por planícies ao sul e ao norte (altitudes em torno de 200 m), com

intemperismo químico profundo, que produziu espessa camada de latossolos, totalmente cobertos por comunidades de floresta Ombrófila Equatorial de numerosas espécies.

De acordo com mapeamento geomorfológico da João et al. (2013), no estado do Pará destacam-se as seguintes paisagens geomorfológicas: planícies de inundação e terraços fluviais das várzeas amazônicas; tabuleiros e baixos platôs modelados em rochas sedimentares pouco litificadas; superfícies de aplainamento das áreas cratônicas; planaltos e serras modelados em coberturas plataformais ou litologias mais resistentes à erosão, como visto na Figura 3.3.

DOMÍNIOS MORFOLÓGIOCOS DO PARÁ Legenda 1- Planície Costeira do Nordeste do Pará; 2 - Ilha de Marajó e Golfão Marajoara; 3 – Planície Amazônica; 4 – Tabuleiros da Zona Bragantina: 5 – Superfície do Rio Gurupi; 6 – Baixos Platôs da Bacia do Parnaiba: 7 – Depressão do Baixo Tocantis-Araguaia: 8 – Baixos Platôs da AM Centro-Oriental: 9 – Planaltos Dissec. Do N da Bacia do AM: 13 10 – Planaltos Disse, Do S da Bacia do AM 11 – Sup. Aplainadas do Norte da AM; 15 12 – Planaltos Residuais do N da AM; 13 – Sup. Aplainadas do S da AM; 14 – Planaltos Residuais do S da AM; 15 – Planalto dissecado do Tapajós; 16 – Serra dos Carajás; 17 – Chapada do Cachimbo; 18 – Dep. Interplanática Jurema-Teles Pire] 19 — Província Mineral de Carajás 200

Figura 3.3 - Domínios geomorfológicos propostos para o estado do Pará. Destaque para a Unidade 16 (Serra de Carajás).

Fonte: Adaptado de João et al. (2013)

Tais ambientes estão submetidos a um regime climático quente e úmido, sob intensa atuação de processos de intemperismo químico e lixiviação

dos solos, que propiciam a formação de paisagens, em geral monótonas, recobertas em quase sua totalidade por vegetação florestal.

A gênese da atual estruturação da paisagem geomorfológica do Pará remonta ao evento de fragmentação do Cráton Amazônico, no início do Paleozóico, e à individualização dos escudos das Guianas e Sul Amazônico. Entre os dois escudos foi gerada uma sinéclise de direção aproximada E-W, com a implantação da grande Bacia Sedimentar do Amazonas, a qual sofreu uma fase de preenchimento desde o Eopaleozoico até o Cretáceo.

Segundo João et al. (2013), o Domínio Morfológico no qual se encontra a Serra de Carajás é caracterizado por um relevo movimentado de um conjunto de morros elevados, por vezes apresentando aspecto montanhoso. frequentemente encimado superfícies por tabulares sustentadas por cangas lateríticas. А unidade se ressalta. topograficamente, em meio às Superfícies Aplainadas do Sul da Amazônia.

Sobre esses terrenos, desenvolve-se, originalmente, Floresta Ombrófila Densa ou Aberta Submontana, com manchas de cerrados sobre as cangas (IBGE, 2004), em solos bem drenados, lixiviados, de espessura variável e baixa fertilidade natural, predominando Latossolos Vermelhos distróficos. Ocorrem, subordinadamente, Plintossolos Pétricos concrecionários e Neossolos Litólicos distróficos (IBGE e EMBRAPA, 2001).

3.2. Província Mineral Carajás

3.2.1. Geologia regional

A Plataforma Sul-Americana (Fig. 3.4), cuja consolidação se completou no final do Neoproteozóico, constitui, junto com a Plataforma Patagônica e a Faixa Andina, uma das três grandes divisões tectônicas do continente sul-americano (Almeida, 1978; Schobbenhaus e Campos, 1984). Essa plataforma, antes denominada Plataforma Brasileira (Almeida, 1967),

forma o núcleo da América do Sul. O Cráton Amazônico representa uma das maiores áreas cratônicas do mundo, estabilizada no final do Mesoproterozóico (Almeida et al. 1976; Cordani 1988). Geograficamente, o Cráton Amazônico é dividido em dois blocos pela Bacia do Amazonas: Escudo das Guianas e Escudo Brasil-Central (ou Guaporé).





Fonte: Adaptado de Almeida et al. (1967).

A Província Mineral de Carajás (PMC) é considerada a maior província mineral do Brasil e engloba expressivos depósitos de Fe (e.g. N4, N5), Cu (e.g. Serra Verde), Au (e.g. Serra Pelada), Mn (e.g. Azul, Buritirama) e Ni (e.g. Vermelho, Onça-Puma). A PMC está inserida em um bloco arqueano (>2,5 Ga) na porção sudeste do Cráton Amazônico (TASSINARI e MACAMBIRA, 2004). Tal bloco, segundo Coutinho (2008), é contido predominantemente no Brasil, estendendo-se ao norte para os países vizinhos (Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa), onde os limites estão encobertos por sedimentos fanerozóicos (Figura 3.4). Dados

geocronológicos, estruturais, litológicos e geofísicos, permitiram a subdivisão deste Cráton em seis províncias geocronológicas (Tassinari e Macambira 2004): Província Amazônia Central (arqueana), Maroni-Itacaiúnas (2,25-1,95 Ga), Ventuari-Tapajós (2,0-1,8 Ga), Rio Negro-Juruena (1.8-1.55 Ga), Rondoniano-San Ignácio (1,55-1,3 Ga) e Sunsas (1,3-1,0 Ga).

Outro modelo, apresentado por Santos et al. (2000) (Figura 3.5), propõe a existência de oito províncias tectônicas, também com base em dados geocronológicos (U/Pb, Sm/Nd e Rb/Sr): Carajás - Imataca (3,10 – 2,53 Ga), Transamazônica (2,25 – 2,00 Ga), Tapajós – Parima (2,10 – 1,87 Ga), Amazônia Central (1,88 – 1,70), Rondônia – Juruena (1,76 – 1,47 Ga), Rio Negro (1,86 – 1,52) e Sunsás (1,33 – 0,99 Ga).

Figura 3.5 - Modelo apresentado por Santos et al. (2000) que propõe a existência de oito províncias tectônicas, em vermelho destaca-se a Província Carajás, na qual está inserida a área de estudo.



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2000).

A Província Mineral de Carajás (PMC) está inserida no contexto evolutivo da Província Carajás-Imataca de Santos et al. (2000). É considerada como a área limitada a leste pelos rios Araguaia-Tocantins, a oeste pelo rio Xingu, a norte pela serra do Bacajá, e a sul pela Serra dos Gradaús (DOCEGEO, 1988), sendo composta por terrenos geológicos datados do Arqueano ao Proterozóico. 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; ROSA-COSTA, 2008).

O Domínio Carajás apresenta como subdomínios tectônicos principais. os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento (Holdsworth e Pinheiro, 2000; Veneziani et al.,2004) . O Sistema Transcorrente Carajás possui como principal estrutura a Falha Carajás, nucleada por volta de 2.6 Ga a 2,0-1,8 Ga, como resultado dos pulsos finais de um evento de transtensão destral atuante na região (PINHEIRO, 1997). É composta por lineamentos descontínuos, anastomosados, com direção preferencial WNW-ESE e extensão total próxima a 180 km (PINHEIRO, 1997).

Os depósitos de Ferro da Serra dos Carajás (Figura 3.6) são delineados pelas rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Grão Pará (Tolbert et al, 1971; Beisiegel et. al., 1973), de idade entre 2,8 a 2,7 Ga (Gibbs et. al. 1986; Meirelles. 1986), composto por metavulcânicas máficas. intermediárias e félsicas. A unidade inferior deste Grupo, que equivale à Formação Parauapebas, previamente proposta por Meireles et. al. (1984), compreende rochas metavulcânicas bimodais (basaltos e dacitos, com riolito subordinado). Rochas metassedimentares e corpos descontínuos de formação ferrífera bandada (FFB) acham-se intercalados. A unidade intermediária do Grupo Grão Pará corresponde às FFB's da Formação Carajás. Esta se associa a rochas vulcânicas sobre e subjacentes e hospeda os depósitos de minério de ferro. Alguns autores enquadram as rochas metavulcânicas superiores aos jaspilitos do Grupo Grão Pará como uma unidade independente denominada Formação Igarapé Cigarra (Macambira et. al. 2001). A Figura 3.7 ilustra o posicionamento estratigráfico do Grupo Grão-Pará em relação às outras unidades litoestratigráficas da PMC (NOGUEIRA, 1995).

57



Figura 3.6 Mapa geológico simplificado da Província Carajás.

Fonte: Adaptado de Docegeo (1988).

UNIDADES		ERATEMA	IDADE RADIOMÉTRICA
FORMAÇÃO GOROTIRE (?) arenitos líticos feldspáticos e conglomerados polimíticos		Proterozóico Médio	
GRANITÓIDES		0	1,8-1,9 Ga
DIQUES		2ÓIC	
FORMAÇÃO ÁGUAS CLARAS	Membro Superior quartzo-arenitos, conglomerados, monomíticos, pelitos subordinados Membro Inferior pelitos, siltitos e quatzo-arenitos	ARQUEANO A PROTEROZ INFERIOR	
GRUPO GRÃO-PARÁ metabasaltos, metarriolitos, metassedimentos, formaçãoferrífera bandada GRUPO IGARAPÉ POJUCA metassedimentos, metavulcânicas báscias, formação ferrífera bandada GRUPO SALOBO quartzitos, gnaisses, anfibolitos, formação ferrífera bandada		ARQUEANO SUPERIOR	2,7 Ga
GRUPO XINGÚ gnaisses polimetamórficos tanalítico- granodioríticos e migmatitos.			2,8 Ga

Figura 3.7 Coluna Estratigráfica das unidades pré-cambrianas da PMC

Fonte: Nogueira et al. (1995).

3.2.2. <u>Geologia local</u>

A mina N5E é constituída de jaspilitos e minérios de ferro de alto teor (Formação Carajás), encaixados em rochas vulcânicas básicas (Formação Parauapebas) de baixo grau metamórfico, incorporadas no Grupo Grão Pará de idade neoarqueana (GIBBS et al. 1986). O trabalho mais atual e detalhado sobre a geologia do depósito de N5E, assim como a caracterização geomecânica dos litotipos aflorantes na área de lavra, é o relatório interno da BVP (2011). De acordo com os dados disponíveis, as litologias presentes nas áreas estão descritas a seguir:

3.2.2.1. Formação Parauapebas

Essa Formação é constituída por rochas vulcânicas metamorfisadas de caráter básico (metabasaltos e metadiabásios), com elevado grau de alteração, formando pacotes de saprolitos argilosos muitas vezes recobertos por cobertura laterítica (canga química). Foram diferenciadas em "Máfica Decomposta" (MD), "Máfica Semi-Decomposta" (MSD) e "Máfica Sã" (MS), e englobam as formações ferríferas da mina nas porções sul, norte, leste e oeste, compondo seus contatos de capa e lapa. Mostram feições de deformação dúctil e rúptil, que são as superfícies de cisalhamento (Figura 3.8).





Fonte: BVP Engenharia (2011).

3.2.2.2. Formação Ferrífera Carajás

Essa Formação é caracterizada por constituir o minério da mina e representada por intercalações das seguintes rochas:

A. Hematita maciça (HM): é o tipo mais predominante de minério e ocorre ao longo de toda a mina, especialmente em sua porção central. O minério é formado por corpos de hematita de baixa consistência, comumente formando pequenas placas mais resistentes (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Hematita laminar.



Fonte: BVP Engenharia (2011).

B. Hematita dura (HD): formada por placas de hematita compacta de até 5 cm de espessura, intercaladas com hematita maciça. Na mina N5E, a HD ocorre na porção central, onde engloba a HM, e também pequenos corpos na porção noroeste da mina, na forma de corpos em geral alongados nas direções NE-SW e NW-SE, que são as direções principais de cisalhamento (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Hematita dura (HD).

Fonte: BVP Engenharia (2011).

C. Canga (CM / CQ): A canga de minério (CM) caracteriza-se por apresentar alto teor de ferro e recobre o minério *in situ*. É formada por blocos de hematita cimentados por óxido de ferro hidratado. A canga química apresenta baixo teor de ferro e recobre as rochas máficas cimentadas por goethita (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Canga de minério recobrindo hematita. CM – Canga de minério e HM – Hematita maciça.

Fonte: BVP Engenharia (2011).

- D. Sills e Diques: Contituídos por corpos de rochas metabásicas encaixados nas rochas ferríferas, destacando-se os *sills* (concordantes com a estruturação das hematitas) e diques (discordantes e mais recentes) com direções em torno de NW e N (Figura 3.12).
- Figura 3.12 Ocorrência de dique de rocha metabásica na formação ferrífera. HM – Hematita maciça.



Fonte: BVP Engenharia (2011).

O mapa geológico da área de estudo é apresentado na Figura 3.13 com os tipos de estruturas encontradas a partir de identificação e medições de

campo e os tipos de rochas diferenciados, além do mapa litogeomecânico da mina N5E com as classes Muito Boa, Boa, Ruim e Muito Ruim (Figura 3.13).



Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

3.2.3. Geologia estrutural da mina N5E

As principais estruturas encontradas na área são: bandamento presente na formação ferrífera; as zonas e superfícies de cisalhamento; as famílias de juntas e falhas. O mapeamento estrutural mais recente foi realizado pela empresa BVP Engenharia (2011).

O bandamento constitui uma importante estrutura local e pode ser notado principalmente nas rochas relacionadas à formação ferrífera. Nas hematitas, o bandamento é caracterizado pela alternância entre bandas maciças e porosas. Por meio da análise do estereograma representado pela Figura 3.14, nota-se que o bandamento apresenta consideráveis variações em sua direção, provavelmente como reflexo da sinuosidade de sua superfície em função da deformação causada por superfícies de cisalhamento e dobras. Apresenta-se orientado segundo a direção NW-SE, mergulhando para SW, com máximo em 249/33.





Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

As superfícies de cisalhamento são comuns na região da mina N5E e podem ser notadas principalmente nas rochas máficas. Em geral, tais

superfícies se apresentam orientadas segundo o *trend* NW-SE, com mergulho para SW e a máxima concentração dos pólos se refere a um plano com atitude 259/36. A Figura 3.15 ilustra a disposição das superfícies de cisalhamento por meio de um estereograma.





Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

As juntas ocorrem em toda a área da mina e são mais freqüentes nas rochas metabásicas. Caracterizam-se por constituírem planos em geral subverticalizados e estão orientadas segundo diversas direções, dificultando, assim, a individualização de famílias. As fraturas ocorrem de maneira persistente, com espaçamento máximo de ordem métrica e em geral apresentam superfície lisa a ondulada. A maioria das juntas é fechada; porém, quando abertas, apresentam-se preenchidas por argila, óxidos e mais raramente quartzo e carbonato.

Foram verificados alguns planos de contato entre os litotipos aflorantes na mina N5E. Pela análise do estereograma apresentado na Figura 3.16, nota-se que a maior parte destes contatos constitui planos concordantes com o bandamento e a foliação das rochas, orientados segundo a direção NW-SE, mergulhando principalmente para SW. A concentração máxima dos pólos é referente a um plano com atitude 262/36.





Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

3.2.4. Informações litogeomecânicas

Com base na interpretação dos dados coletados em campo, foi feita a classificação geomecânica de cada litotipo, utilizando-se dos parâmetros estabelecidos pelo sistema RMR (*Rock Mass Rating*), conforme Bieniawski (1989), adaptado pela Vale.

Para a obtenção da Classe de Maciço, consideram-se diferentes pesos para os parâmetros levantados em campo, referentes à sua relevância em relação à estabilidade do mesmo: Grau de consistência; Grau de faturamento; Grau de alteração. Quanto maior a contribuição do parâmetro geomecânico no controle da estabilidade do maciço, maior será seu peso. Após esta atribuição de valores, efetua-se um somatório dos resultados, onde o valor resultante é o RMR. Com o valor do índice RMR, define-se então a classe geomecânica de cada ponto descrito em campo, conforme apresentado na Tabela 3.1. A Tabela 3.2 apresenta as

descrições dos graus considerados no RMR e sua posterior classificação geomecânica de acordo com as classes de I a V.

VALORES DE RMR	CLASSE DE MACIÇO	DESCRIÇÃO
100-81		EXCELENTE
80-61	11	MUITO BOA
60-41	111	BOA
40-21	IV	RUIM
<20	V	MUITO RUIM

Tabela 3.1: Definição das classes de maciços rochosos a partir do valor RMR.

Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

Tabela 3.2: Classificação dos litotipos em relação à qualidade geomecânica.

LITOTIPO (SIGLA)	DESCRIÇÃO	CLASSE
Hematita Dura (HD)	Baixo grau de alteração e alto grau de consistência. Fraturamento varia principalmente entre pouco fraturado a moderadamente fraturado.	II
Hematita Macia (HM)	Alto grau de alteração e baixo grau de consistência. O grau de fraturamento é alto.	V
Máfica Sã (MS)	Evidências claras de alteração e possuem alto grau de consistência. O grau de fraturamento varia entre moderadamente fraturado a muito fraturado.	II
Máfica Semi- Decomposta (MSD)	Moderadamente a altamente alterado e possuem grau de consistência médio. Por vezes grau de consistência médio macio e médio duro. As rochas máficas semi- decompostas se encontram moderadamente fraturadas.	III e IV
Máfica Decomposta	Completamente alteradas e com baixo grau de consistência. Este litotipo possui grau de fraturamento variável, que vai de pouco fraturado a muito fraturado.	IV

Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

O mapa litogeomecânico é elaborado a partir do mapa geológico da cava e da classificação do maciço obtido pontualmente através do mapeamento, como explicado nesse tópico. Como pode ser observado na Figura 3.17, há uma predominância das Classes IV e V na mina, destacando-se os litotipos de máficas decompostas e hematitas macias. Todavia, na parte central da mina, a classe II é que predomina em função da rocha máfica sã.



Fonte: Adaptado de BVP Engenharia (2011).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Na presente pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

- 33 cenas no formato Single Look Complex (SLC) do TSX-1 adquiridas em órbita ascendente, modo StripMap e polarização HH, no período entre 20 de março de 2012 a 07 de abril de 2013. A resolução espacial das cenas equivale a 3,3 m em azimute e 1,9 m em alcance. O intervalo dos ângulos de incidência varia de 39° (near range) a 42° (far range);
- MDE com acurácia vertical de 1,5 m, gerado no software PCI Geomatics a partir de um par estéreo de imagens pancromáticas do satélite GeoEye-1 adquiridas em 01 de julho de 2012 (PARADELLA; CHENG, 2013);
- 1 cena StripMap do satélite TSX-1 (banda X-HH), adquirida em órbita descendente em 04 de dezembro de 2008, feixe 007, com ângulo de incidência de 30,97° no centro da cena e resolução espacial de 3,02 × 3,01 m em range e azimute, respectivamente;
- 1 cena RADARSAT-2 na polarização HH, no modo UF (feixes 5 e 21), adquirida em 23 de junho de 2009, em órbita descendente (visada para oeste, azimute de visada de 282 graus). A resolução espacial em range e azimute é de 3,48 × 2,80 m (UF5) e 2,44 × 2,80m (UF21), os ângulos de incidência no centro da cena são de 33,86° e 45,42°, respectivamente;
- Imagens ortorretificadas GeoEye-1, pancromática e multiespectral, da área de estudo, com resolução espacial de 3 metros. O processamento de ortorretificação foi executado no módulo OrthoEngine, disponível no software PCI Geomatics (versão 2013);
- Relatórios técnicos e dados litoestruturais e geomecânicos atualizados da Mina N5E fornecidos pela Vale S.A.;

- Dados de pluviometria da Estação da Mina N5E do período entre março de 2012 e abril de 2013, fornecidos pela Vale S.A.;
- Dados topográficos fornecidos pela Vale S.A. para a validação dos resultados de deformação (LoS) do período seco e chuvoso.

Os software utilizados no processamento dos dados foram:

- Software GAMMA Remote Sensing (WERNER et al., 2000), módulos IPTA, ISP, DIFF/GEO e DISP, para o processamento interferométrico;
- PCI Geomatics (versão 2013), especificamente a função 3D Setreo do pacote OrthoEngine, para a geração do estéreo-par;
- Software ArcGIS 10.0, para a integração dos dados e confecção dos layouts dos mapas de deformação;
- Microsoft Excel 2010, para a manipulação dos dados topográficos e confecção dos gráficos de validação;
- Matlab (versão 2014), para interpolação exponencial dos dados topográficos fornecidos pela Vale S.A.;
- Statistica v. 08 (2008), para a realização do teste estatístico para validação dos dados de deformação em LoS.

4.2. Metodologia

A metodologia realizada neste trabalho está expressa no fluxograma abaixo (Figura 4.1). Inicialmente, com uma cena do RADARSAT-2 e uma cena do TerraSAR-X, é realizado a geração do estéreo-par para futura interpretação geológica. As 33 cenas do TSR-X e o DEM são utilizadas para o processamento interferométrico, tanto para o DInSAR-TS como para o PSI. Para ambos os processamentos, são geradas pilhas de mapas de deformação em LoS, na qual há uma individualização dos conjuntos dos períodos seco e chuvoso. Os dados topográficos de prismas são utilizados para validação estatística com a informação de deformação obtida no processamento. O resultado da fotointerpretação geológica e os mapas de deformação em LoS, para ambas as técnicas interferométricas, são integrados aos dados da Vale S.A. (geomecânicos e litoestruturais), além de dados pluviométricos da região, para que sejam feitas as análises dos resultados obtidos.





Fonte: Produção do autor.

4.2.1. Organização do conjunto de imagens TSX-1

Para os processamentos interferométricos, as 33 cenas TSX-1 foram divididas em dois conjuntos: período seco e o período chuvoso, levando em consideração aspectos climáticos (Tópico 3.1.2) com dados pluviométricos da estação metereológica localizada na região da mina.

A individualização dos dois conjuntos é feita para observar a influência da precipitação na estabilidade global dos taludes de bancada da mina N5E. Como observado por Paradella et al. (2015a), a influência de chuva durante a aquisição das imagens pode causar baixa coerência nos pixels, o que ocasiona a perda de informação no resultado final da técnica

interferométrica (Figura 4.2). Em seu estudo, os mesmos autores observaram a diminuição de PS quando se utilizou um conjunto com a estação seca e chuvosa juntas, em relação ao mesmo processamento com imagens da estação seca. Essa perda de informação foi atribuída a diversas causas, principalmente a influência da precipitação.

Figura 4.2 – Mapas de deformação em superfície da mina N4E. 1) referente ao período de monitoramento de 20/Março-10/Agosto de 2012 (estação seca); 2) referente ao período de 20/Março/2012 a 20/Abril/2013. Foram utilizadas 33 imagens TSX-1 (época seca e chuvosa).



Fonte: Paradella et al. (2015a).

Neste trabalho, a estação seca será composta pelas 19 primeiras cenas, entre 20 de março a 04 de outubro de 2012, adotando-se a imagem de 08 de julho como a de referência. O segundo grupo será formado por 15 cenas correspondentes ao período chuvoso, adquiridas entre o período de 04 de outubro de 2012 e 20 de abril de 2013, considerando a imagem de 20 de dezembro de 2012 como referência.

4.2.2. Metodologia para geração do estéreo-par

A fotointerpretação estereoscópica seguiu os procedimentos convencionais para uso da função 3D *Stereo* do pacote *OrthoEngine* do *software PCI Geomatics,* visando à extração de informações a partir de um estéreo-par de imagens SAR. As imagens utilizadas no processamento foram:

- 1 cena StripMap do satélite TSX-1 (banda X-HH), adquirida em órbita descendente em 04/dezembro/2008, feixe 007, com ângulo de incidência de 30,97° no centro da cena e resolução espacial em range e azimute de 3,02 × 3,01 m, respectivamente;
- 1 cena Ultra-Fine do satélite RST-2 (banda C-HH), obtida em órbita descendente em 23/junho/2009, feixe 21, com resolução espacial em range e azimute de 2,44 × 2,80 m, respectivamente, e ângulo de incidência no centro da cena de 45,42°.

O procedimento seguiu os seguintes passos (conforme a Figura 4.3): (1) definição do projeto: modelagem dos dados de radar através do modelo empírico *Rational Function Model* (RFM); (2) entrada dos dados das duas imagens SAR (TerraSAR-X modo *StripMap* e RADARSAT-2 modo *UltraFine*); (3) identificação de cerca de 20 pontos de controle (*tie-points*) para amarração espacial das duas cenas; (4) o cálculo do modelo de ajuste; (5) transformação das imagens originais em epipolares; (6) extração das feições 3D.

As imagens epipolares são pares estereoscópicos de imagens, que são reprojetadas de tal forma que tenham as mesmas orientações e as feições comuns entre elas, alinhadas em um mesmo eixo.

A fase 3 consiste na escolha de 20 *Tie-points* conhecidos e com melhor espaçamento possível, para que resulte em uma amarração das cenas de modo mais preciso.

Após a coleta dos GCPs, a fase 4 envolve a transformação de duas imagens de uma única cena em uma geometria chamada de epipolar (Lee

e Park, 2002). Para visualizar imagens em estereoscopia, as mesmas são reamostradas em geometria epipolar ou quase-epipolar, onde apenas a paralaxe, relacionada à elevação, é eliminada (Toutin e Gray, 2000).

A extração de feições geológicas 3D é realizada através de edição vetorial sobreposta ao estéreo-par. A fotointerpretação geológica foi baseada em critérios morfoestruturais adaptados às características peculiares das imagens SAR (SANTOS et al., 2001). A fotointerpretação tem como objetivo principal a identificação das estruturas planares maiores (fraturas e falhas) no interior da cava N5E para auxiliar, juntamente com outros dados disponíveis (mapas lito-geomecânicos com medidas estruturais de campo de foliações, bandamentos е cisalhamentos), as análises sobre estabilidade dos taludes de corte destas cavas.





Fonte: Produção do autor.
4.2.3. Metodologia para a geração da dinsar time-series (DInSAR-TS)

Para geração dos mapas de deformação na Mina N5E para o período de aguisição das cenas TSX-1, foi utilizada a abordagem DInSAR-TS. A primeira etapa dessa metodologia corresponde ao corregistro preciso da pilha de imagens SAR, em relação à imagem de referência (mestre), que apresenta menor linha de base perpendicular para obter a menor descorrelação geométrica (ZEBKER; VILLASENOR, 1992). Além disso, tal imagem apresenta um posicionamento, aproximadamente, no centro da série temporal para que a coerência interferométrica seja maximizada. Para o processamento, dividiram-se as 33 cenas TSX-1 em dois conjuntos: o do período seco e o do período chuvoso. No primeiro grupo, foram selecionadas as 19 primeiras cenas, correspondentes ao período seco, entre 20 de março a 04 de outubro de 2012, sendo a imagem de 08 de julho adotada como a de referência. O segundo grupo foi formado por 15 cenas correspondentes ao período chuvoso, adquiridas entre 04 de outubro de 2012 e 20 de abril de 2013, sendo a imagem de 20 de dezembro de 2012 adotada como referência. O objetivo dessa divisão foi de observar a influência da precipitação na estabilidade global dos taludes de bancada.

A Figura 4.4 ilustra o fluxograma de processamento da metodologia DInSAR-TS. Na etapa seguinte ao corregistro, foram gerados os interferogramas diferenciais, par a par, onde cada par interferométrico diferencial foi construído em um dado intervalo de tempo segundo as regras de menor intervalo de tempo (Δ t) entre as aquisições ou de subconjunto de linha de base (Bn) (BERARDINO et al., 2002). O objetivo é minimizar efeitos como a descorrelação espacial e erros topográficos. Todos os interferogramas foram obtidos utilizando uma operação "*multilook*" com janela 2x2, resultando em um pixel de dimensão de 2,6 por 3,8 m em alcance e em azimute, respectivamente.

A seleção dos pares interferométricos diferenciais, para a análise da série temporal DInSAR-TS, foi baseada no critério de maior coerência interferométrica média, de modo a reduzir os erros de desdobramento de

77

fase. Os interferogramas diferenciais foram obtidos pela remoção da fase referente ao MDE. Um ponto de referência foi escolhido (em uma construção, considerada como área estável) e sua fase removida de todos os interferogramas diferenciais, gerando uma pilha de interferogramas diferenciais em relação a um ponto de referência estável. Para o processo de desdobramento da fase dos interferogramas foi utilizado o algoritmo *Minimum Cost Flow*-MCF (Constantini, 1998).

A partir da pilha de interferogramas diferenciais, aplicou-se em cada pixel (com coerência maior que a estabelecida) a análise temporal através da solução do sistema de equações baseadas no método *Single Value Decomposition* - SVD, que aplica restrições na aceleração do deslocamento para controlar as variações bruscas no resultado da série temporal, com parâmetro de suavização da série temporal de 1,6. A partir do resultado deste processamento, são gerados os mapas de deformação e de qualidade das medidas de deformação obtidas.





Fonte: Produção do autor.

4.2.4. Metodologia para geração do IPTA

O processamento interferométrico da abordagem IPTA, conforme a Figura 4.5, consiste inicialmente, em gerar uma pilha de imagens corregistradas no formato SLC (Single Look Complex), para a construção dos pares interferométricos. Como ilustrado na Figura 2.13, na metodologia PSI seleciona-se uma imagem de referência (imagem mestre) para a construção dos pares interferométricos. Esta imagem é selecionada baseada em uma configuração que apresente baixos valores de linha de base perpendicular, e que esteja próximo ao centro temporal da sequência de imagens, para garantir uma boa coerência interferométrica entre os pares. Na sequência do processamento, são subtraídas da pilha de interferogramas, as fases correspondentes à topografia extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE), resultando em uma nova pilha de interferogramas diferenciais em relação a um ponto de referência estável selecionado na área de cobertura das imagens. O módulo IPTA trabalha com dois critérios para identificação de candidatos a espalhadores persistentes, cujos resultados podem ser combinados numa única lista (Figura 4.5) e, posteriormente, analisados quanto à sua qualidade, a saber: (a) variabilidade temporal e (b) diversidade espectral. O primeiro é recíproco ao índice de dispersão da amplitude (FERRETTI et al., 2000). O segundo baseia-se no fato de que a refletividade de um PS deva permanecer aproximadamente constante durante todas as observações, mesmo sob diferentes geometrias da aquisição da imagem SAR. Na etapa seguinte, ocorre a junção dos candidatos a PS (Figura 4.6C).

79

Figura 4.5 - Fluxograma do processamento da técnica IPTA no Software GAMMA, versão 20130717.



Figura 4.6 - Seleção da lista de candidatos a PS na Mina 1 do Complexo do Azul a partir dos critérios (A) Variabilidade temporal; (B) Diversidade espectral; (C) Fusão de (A) e (B).



A análise de um ponto nessa abordagem, disponível no *software* IPTA, é baseada em um modelo de regressão bidimensional, pois existe uma dependência linear da fase topográfica com a linha de base perpendicular; também é assumida uma dependência linear da deformação com o tempo. Os resíduos da regressão linear da deformação contêm os componentes de fase relacionados com a fase atmosférica, bem como aqueles associados às deformações não lineares e ruídos. Estes resíduos são filtrados espacialmente para minimizar a fase atmosférica, bem como os ruídos de fase, possibilitando a recuperação do componente de fase relacionado à deformação não linear. A análise PSI é realizada para todos os PS, possibilitando a geração de um mapa de deformação da área de trabalho, bem como de um mapa da qualidade de cada ponto analisado.

Um dos aspectos importantes da técnica IPTA é a possibilidade do processamento interativo, passo a passo, para refinamento do modelo (atualizar o MDE, atualizar taxas de deformação, refinar a linha de base e descartar os pontos não apropriados).

4.2.5. Validação estatística

A validação estatística utilizada no trabalho foi o teste não-paramétrico de Wilcoxon, desenvolvido por F. Wilcoxon em 1945, com a finalidade de verificar se as medidas de posição de duas amostras são iguais, caso em que as amostras são dependentes. Foi utilizado o *Software Statistica* v 8.0; 2008 para realizar tal procedimento, que testa diferenças nas distribuições populacionais, de modo que as hipóteses nula e alternativa são:

- H₀: as duas amostras provém de populações com a mesma distribuição;
- H₁: as duas amostras provém de populações com distribuições diferentes.

Procedimento básico:

- Para cada par de dados, acha-se a diferença d, subtraindo o segundo valor do primeiro. Conservam-se os sinais, mas ignora-se quaisquer pares para os quais d= 0;
- Ignoram-se os sinais das diferenças e ordena-se os valores do menor para a maior, e substitui-se pelo valor do posto correspondente. Quando as diferenças tiverem o mesmo valor numérico, associa-se a elas a média dos postos envolvidos no empate;
- Atribue-se a cada posto o sinal da diferença que o originou. Ou seja, insere-se os sinais ignorados no Passo 2;
- Acha-se a soma dos valores absolutos dos postos negativos e dos postos positivos;
- Seja *T* a menor das duas somas encontradas no Passo 4. Qualquer das somas poderia ser usada, mas, para um procedimento simplificado, seleciona-se arbitrariamente a menor delas;
- Seja N o numero de pares de dados para os quais a diferença d não é 0;
- Determina-se a estatística de teste e os valores críticos com base no tamanho amostral. Se N < 30, então o valor teste é *T*;
- Ao formar a conclusão, rejeita-se a hipótese nula se os dados amostrais levarem a uma estatística de teste (valor T) que esteja na região critica, isto é, se o valor T for menor do que ou igual ao(s) valor(es) critico(s). Em caso contrário, aceita-se a hipótese nula.

Finalmente, o teste não-paramétrico de Wilcoxon foi aplicado para verificar se as medições de deformação do DInSAR-TS e PSInSAR, para ambas as estações, proporcionam uma inferência de deslocamento semelhante às medições do prisma. Foi utilizado para testar a hipótese nula (H₀) de que duas populações têm o mesmo valor mediano e,

portanto, podem ser consideradas estatisticamente semelhantes, com um nível de significância de 5%. Se este for o caso, então a estratégia de medição baseada em ambos os processamentos interferométricos pode ser presumida como sendo representativa do deslocamento de superfície expresso por valores de prisma.

Os dados de deformação medidos por prismas cobrem o intervalo de 155 dias Julianos (24 de abril de 2012 - 25 de janeiro de 2012), para o período seco e 89 dias Julianos (06 de novembro de 2012 - 02 de fevereiro de 2013) para o período chuvoso.

Como a aquisição das imagens não foi exatamente nos mesmos dias que os dados de deformações obtidos pela empresa Vale S.A., foi efetuada uma interpolação dos dados de prisma no *software matlab* (versão 2014), a fim de equalizar as medidas para os mesmos dias da aquisição das imagens. Uma vez feita essa interpolação, pôde-se realizar o teste estatístico.

4.2.6. Banco de dados

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

5 RESULTADOS

5.1. Estereoscopia

No procedimento de fotointerpretação estereoscópica utilizam-se imagens originais sem correção geométrica (ortorretificação) para que seja mantida a paralaxe necessária para a visão tridimensional. Desta forma, houve a necessidade de correção do posicionamento das estruturas fotointerpretadas através de um georreferenciamento utilizando uma imagem TSX-1 previamente ortorretificada. A Figura 5.1 mostra o traçado das fraturas na cava N5E, com estruturas geológicas extraídas do mapeamento geológico-estrutural com base no mapeamento da BVP Engenharia (2011), sobrepostas à imagem Geoeye-1 pancromática de 01 de julho de 2012.

Figura 5.1 - Fraturas fotointerpretadas (cor amarela) e fraturas fotointerpretadas pela empresa BVP (cor verde) na cava N5E, sobrepostas a uma imagem GeoEye-1 Pancromática de 01/julho/2012.



Fonte: Produção do autor.

5.2. Processamento interferométrico

Para o processamento interferométrico, foram utilizadas as seguintes abordagens: DInSAR-TS e PSI. Cada metodologia gerou dois mapas de deformação, um relativo ao período seco e o outro ao período chuvoso.

O ponto de referência adotado para ambos os processamentos está localizado nas coordenadas 596728,703 mE e 9328725,009 mN, segundo a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o DATUM WGS84 para a Zona 22 Sul (Figura 5.2). O ponto de referência é escolhido na imagem, com a propriedade de ser um local estável (que não haja possibilidade de ocorrer deformação no intervalo da série temporal de imagens) na área de estudo. Assim, os dados de deformação serão a ele relacionados. No caso, o ponto escolhido foi em uma área construída que não havia relatos de sinais de deformações.





Fonte: Produção do autor.

Os itens a seguir fornecem os resultados obtidos através das abordagens interferométricas para ambos os períodos. Em todos os mapas de

deformação, as cores quentes significam afastamento do alvo em relação ao sensor, ou seja, subsidência. Ao passo que, as cores frias representam aproximação do alvo em relação ao sensor (soerguimento).

5.2.1. DInSAR-TS chuvoso

As imagens do período chuvoso foram corregistradas em função da imagem mestra, do dia 20 de dezembro de 2012 (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Imagens selecionadas para o processamento do período chuvoso.

Imagem mestre	Imagem escrava (ano/mês/dia)
	20121004
	20121015
	20121026
	20121106
	20121117
	20121128
	20121209
20121220	20121220
	20130111
	20130122
	20130202
	20130318
	20130329
	20130409
	20130420

Fonte: Produção do autor.

Os interferogramas diferenciais para o período chuvoso foram produzidos considerando valores máximos de linha de base perpendicular iguais a 250 m e linha de base temporal equivalente a 45 dias (Figura 5.3).



Figura 5.3 - Pares de interferogramas para o período chuvoso.

A Figura 5.4 apresenta os mapas de deformação pela técnica DInSAR-TS para o período chuvoso, dos pares interferométricos, cujo mapa final de deformação está ilustrado na Figura 5.5. Nesse, o valor máximo de afastamento do alvo em relação ao sensor (subsidência) detectado foi - 6,6795 cm/ano (Figura 5.6), nas coordenadas: 596463,519 mE e 9327860,683 mN.



Figura 5.4 - Mapas de deformação temporal para o período chuvoso pela

Fonte: Produção do autor.



Figura 5.5 - Mapas de deformação LoS para o período chuvoso – DInSAR TS.

Figura 5.6 - Deformação temporal para o período chuvoso sob o ponto P2 pela DInSAR-TS.



Fonte: Produção do autor.

5.2.2. DInSAR-TS seco

As imagens do período seco foram corregistradas em função da imagem mestra, do dia 08 de julho de 2012 (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Imagens	selecionadas para	o processamento	do período
seco.			

Imagem mestre	Imagem escrava (ano/mês/dia)
	20120320
	20120331
	20120411
	20120422
	20120503
	20120514
	20120525
20120708	20120605
20120708	20120616
	20120627
	20120708
	20120719
	20120730
	20120810
	20120821
	20120901
	20120912
	20120923
	20122104

Os interferogramas diferenciais para o período seco foram produzidos considerando valores máximos de linha de base perpendicular iguais a 250 m e linha de base temporal equivalente a 45 dias (Figura 5.7).



Figura 5.7 - Pares de interferogramas para o período seco.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.8 apresenta os mapas de deformação acumulada pela técnica DInSAR-TS para o período seco, dos pares interferométricos, cujo mapa final de deformação está ilustrado na Figura 5.9. Nesse, o valor máximo para afastamento (subsidência) detectado foi -9,275 cm/ano (Figura 5.10), nas coordenadas: 596188,357 mE e 9328678,685 mN.



Figura 5.8 - Mapas de deformação temporal acumulada para o período seco pela DInSAR-TS.



Figura 5.9 - Mapas de deformação LoS para o período seco – DInSAR TS.

Figura 5.10 - Deformação temporal para o período seco sob o ponto P1 pela DInSAR-TS.



Fonte: Produção do autor.

5.2.3. PSInSAR chuvoso

A Tabela 5.4 fornece as principais características dos pares interferométricos para o período seco, com os valores de linha de base perpendicular (Bperp) e linha de base de tempo (Bt).

Tabela 5.4 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período chuvoso.

	Imagem Mestre	Imagem Escrava (ano/mês/dia)	B _{perp} médio (m)	Bt (dias)
1	20121220	20121004	-55,66	-77
2	20121220	20121015	137,00	-66
3	20121220	20121026	126,33	-55
4	20121220	20121106	-420,25	-44
5	20121220	20121117	-2,91	-33
6	20121220	20121128	-118,16	-22
7	20121220	20121209 -169,70		-11
8	20121220	20121220	Auto-Interferograma	
9	20121220	20130111	-198,93 22	
10	20121220	20130122	-330,38	33
11	20121220	20130202	-153,24	44
12	20121220	20130318	-152,84	88
13	20121220	20130329	67,18	99
14	20121220	20130409	109,55	110
15	20121220	20130420	-30,64	121

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.11 representa o mapa de deformação em LoS obtido através do processamento PSI para o período chuvoso. Nesse caso foram identificados 14.297 PS em uma área de 12,6 km², totalizando uma densidade de 1.135 PS/km². Analisando os valores de deformação dos PS, o valor máximo de deformação indicativa de afastamento em relação ao SAR (subsidência) foi de -0,95 cm/ano, como ilustrado na Figura 5.12.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.12 - Deformação temporal para o período chuvoso sob o PS # .122157 pelo PSInSAR.





5.2.4. PSInSAR seco

A Tabela 5.5 fornece as principais características dos pares interferométricos para o período seco, com os valores de linha de base perpendicular (B_{perp}) e linha de base de tempo (B_t).

	Imagem Mestre	Imagem Escrava (ano/mês/dia)	B _{perp} médio (m)	B _t (dias)
1	20120708	20120320	74,0631	-110
2	20120708	20120331	-81,7428	-9.9
3	20120708	20120411	-138,8550	-88
4	20120708	20120422	404,9870	-77
5	20120708	20120503	-1.171.465	-66
6	20120708	20120514	97,9995	-55
7	20120708	20120525	3.812.809	-44
8	20120708	20120605	-7,3948	-33
9	20120708	20120616	-225,7729	-22
10	20120708	20120627	479,2036 -11	
11	20120708	20120708	Auto-Interferograma	
12	20120708	20120719	-160,8997	11
13	20120708	20120730	274,9837	22
14	20120708	20120810	388,8153	33
15	20120708	20120821	-119,2195	44
16	20120708	20120901	-77,6721	5.5
17	20120708	20120912	-151,9791	66
18	20120708	20120923 306,0623		77
19	20120708	20121004	164,8767	88

Tabela 5.5 - Parâmetros dos pares interferométricos para o período seco.

Fonte:	Produção	do autor.
--------	----------	-----------

A Figura 5.13 representa o mapa de deformação em LoS obtido através do processamento PSI para o período seco. Foram identificados 24.466 PS em uma área de 12,6 km2, totalizando uma densidade de 1.942 PS/km². Analisando os valores de deformação dos PS, o valor máximo de deformação indicativa de afastamento em relação ao SAR foi de -1,18 cm/ano, como ilustrado na Figura 5.14.



Figura 5.13 - Mapas de deformação LoS para o período seco PSInSAR.

Figura 5.14 - Deformação temporal para o período seco sob o PS # 122085 pelo PSInSAR.





5.3. Validação dos resultados

Em uma tentativa de validar os resultados da deformação (LoS) com dados *in situ*, foram utilizadas medidas de prismas topográficos, restritas ao monitoramento dos taludes leste da cava da mina N5E (Figura 5.15). No total, existem sete prismas com monitoramento entre 02/08/2011 a 19/03/2013 (nota-se que é um range temporal inferior em relação às imagens TSX-1). Considerando que as medições por imagens SAR (TSX-1) e os dados topográficos têm monitoramento com linhas de visadas diferentes, o componente de movimento topográfico vertical foi também projetado para LoS, de modo que esteja na mesma projeção que os dados gerados pelo processamento interferométrico. Esse procedimento foi realizado multiplicando-se os valores das medidas topográficas pelo coseno do ângulo de incidência (Θ = 41,3°).

Figure 5.15. Localização espacial dos sete prismas topográficos utilizados nas medidas de campo na parte leste dos taludes da cava da mina N5E.



Fonte: Produção do autor.

Utilizando o *software* ArcGIS, os prismas e os resultados dos processamentos interferométricos foram sobrepostos à ortoimagem GeoEye pancromática, a fim de explorar as relações espaciais entre os dados (Figura 5.16). Para a validação dos dados gerados, foram criados quatro gráficos (Figura 5.17). O prisma topográfico escolhido para a validação foi o número dois, devido à existência de PS localizados na mesma coordenada geográfica, nas duas estações. O PS selecionado foi: PS #772277, para a estação chuvosa (Figura 5.17A); e o PS #67541 a estação seca (Figura 5.17B). Todos os pontos utilizados para a validação do IPTA e os mapas do DInSAR-TS, tanto na estação seca, quanto na chuvosa (Figura 5.17C e D), possuem as mesmas coordenadas geográficas do prisma número dois: 597277,448 mE; 9327840,373 mN.

A Vale S.A., define um limiar de segurança de +/- 2 cm de deslocamento nos taludes dentro das minas a céu aberto. Isto é, deslocamentos maiores do que este limite representam um risco de colapso de minério, instrumentação e pessoas envolvidas. Esse valor também foi projetado

101

para LoS, de modo que estivesse na mesma projeção que os dados gerados pelo processamento realizado, multiplicando-o pelo coseno do ângulo de incidência (Θ = 41,3°) resultando em um valor de +/- 1,53 cm. Os gráficos mostram que, tanto na estação seca quanto na estação OS chuvosa para ambos processamentos interferométricos, as deformações na superfície, durante a cobertura de passagem TSX-1, estão dentro do limiar de segurança do minerador e não representam um risco de segurança. Com exceção do gráfico do DInSAR-TS da estação seca, no dia 27/06/2012, apresentou um valor de -1,631 cm, porém este valor está muito próximo ao limite estabelecido (-1,53 cm). Os maiores valores de deformação de subsidência e soerguimento medidos pelo levantamento topográfico se encontram na Tabela 5.5 e, de acordo com o departamento geotécnico da Vale S.A., são considerados normais para taludes de uma mina a céu aberto.

Figura 5.16 – Mapa de monitoramento de deformações superficiais, juntamente com os prismas topográficos, sobrepostos à imagem pancromática GeoEye. A) IPTA Chuvoso; B) PSI Seco; C) DInSAR-TS Chuvoso; D) DInSAR-TS Seco.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.17 – Gráficos de deformação em superfície relacionados ao prisma 02 . A) PSI Chuvoso; B) IPTA Seco; C) DINSAR-TS Chuvoso; D) DINSAR-TS Seco.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.5 – Valor de deformações de máxima subsidência e soerguimento encontradas pelo monitoramento de campo, para a coordenada:597277,448 mE; 9327840,373 mN.

	Def. de	Campo (cm)	Def. DInS	SAR-TS (cm)	Def. P	PSI (cm)
	Chuv.	Seca	Chuv.	Seca	Chuv.	Seca
Valor máx. de subsidência	-0,54	-1,255	- 0,3175	-1,631	-0,488	-0,725
Valor máx. de soerguimento	0,714	0,639	1,41	0,134	1,221	0,639

Os pontos relacionados aos prismas exibiram uma maior dispersão das medições. Isto pode ser explicado por vários fatores, incluindo condições climáticas adversas (poeira e neblina durante as estações seca e úmida prejudicam a visibilidade entre estações e prismas), equipes de operadores distintos e erros de interpolação. A série temporal dos processamentos interferométricos mostrou uma boa correlação com a informação de campo, indicando condições estáveis para a mina N5E. Infelizmente, não houveram medições dos prismas até o final da estação chuvosa (dados disponíveis até a data de 19/03/2013). As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram a relação de amostras existentes, no total de 15 para o período seco e 8 para o período chuvoso. No propósito de aumentar o número de amostras para maior eficiência do teste estatístico, juntaramse os períodos (Tabela 5.8), totalizando 23 amostras. Esse fato não altera a eficácia da validação, uma vez que a metodologia para a geração das amostras é a mesma e as informações se completam temporalmente. De acordo com o teste de Wilcoxon, a hipótese nula para cada par de amostras foi aceita (verdadeira), para um nível de 5% de significância, pelo valor de teste (valot T) ser maior que o P-valor, como pode ser observado na Tabela 5.9. Portanto, a deformação medida através das técnicas inteferométricas se demonstraram compatíveis às medidas em campo.

Data	Def. de	DInSAR-TS	
Dala	Campo	Seco	F31 3ec0
24/04/12	-0,676	0,1344	-0,896700
03/05/12	-0,34492437	-0,1268	-0,684900
14/05/12	-0,774037348	-0,8085	-0,581900
22/05/12	0,136493506	-0,7325	-0,464700
05/06/12	-0,248	-0,5396	-0,490700
16/06/12	-0,241142857	-0,8012	-0,409900
27/06/12	0,080863636	-1,6315	-0,339600
08/07/12	-0,211922078	-1,4403	-0,077400
24/07/12	-0,188	-1,2408	0,944000
31/07/12	-1,255	-0,7319	0,248200
21/08/12	-0,143	-0,8412	0,273900
24/08/12	0,248	-0,7257	0,448600
04/09/12	-0,143	-1,1458	0,639700
14/09/12	0,413	-0,8834	0,875500
25/09/12	0,173	-0,9724	1,094100

Tabela 5.6 – Relação das amostras para a estação seca.

Tabela 5.7 – Relação das amostras para a estação chuvosa.

Data	Def. de	DInSAR-TS	BSI Chuyoso
Dala	Campo	Chuvoso	F31 C110050
06/11/12	0,331	0,9824	-0,488500
17/11/12	-0,002285714	1,4113	-0,368900
28/11/12	-0,051761905	0,6551	-0,204000
09/12/12	-0,8474	-0,2657	-0,176400
20/12/12	0,398792017	-0,3715	-0,119700
11/01/13	0,015	0,3187	-0,296000
22/01/13	0,015	0,0192	0,276400
02/02/13	0,726596491	0,8275	0,276400

Data	Def. de		DCI
Dala	Campo	DIIISAR-13	FJI
24/04/12	-0,676	0,1344	-0,896700
03/05/12	-0,34492437	-0,1268	-0,684900
14/05/12	-0,774037348	-0,8085	-0,581900
22/05/12	0,136493506	-0,7325	-0,464700
05/06/12	-0,248	-0,5396	-0,490700
16/06/12	-0,241142857	-0,8012	-0,409900
27/06/12	0,080863636	-1,6315	-0,339600
08/07/12	-0,211922078	-1,4403	-0,077400
24/07/12	-0,188	-1,2408	0,944000
31/07/12	-1,255	-0,7319	0,248200
21/08/12	-0,143	-0,8412	0,273900
24/08/12	0,248	-0,7257	0,448600
04/09/12	-0,143	-1,1458	0,639700
14/09/12	0,413	-0,8834	0,875500
25/09/12	0,173	-0,9724	1,094100
06/11/12	0,331	0,9824	-0,488500
17/11/12	-0,002285714	1,4113	-0,368900
28/11/12	-0,051761905	0,6551	-0,204000
09/12/12	-0,8474	-0,2657	-0,176400
20/12/12	0,398792017	-0,3715	-0,119700
11/01/13	0,015	0,3187	-0,296000
22/01/13	0,015	0,0192	0,276400
02/02/13	0,726596491	0,8275	0,276400

Tabela 5.8 – Relação das amostras para toda a estação.

Tabela 5.9 – Resultado do teste de Wilcoxon para um nível de significância de 5%.

	Valor T	P-valor
DInSAR-TS Seco x Def. de Campo	13,0000	0,007599
PSI Seco x Def. de Campo	40,0000	0,255989
DInSAR-TS Chuvoso x Def. de	7.0000	0.123486
Campo	,	-,
PSI Chuvoso x Def. de Campo	9,0000	0,207579
DInSAR-TS Geral x Def. de Campo	80,0000	0,128324
PSI Geral x Def. de Campo	128,0000	0,761014

6 DISCUSSÃO

As fraturas fotointerpretadas foram delineadas através da observação em visão tridimensional de cicatrizes de expressão morfológica, lineares e distribuídas ao longo da cava N5E. Estas cicatrizes são muito bem caracterizadas tridimensionalmente e podem ser associadas a sistemas de fraturas, com um bom nível de confiabilidade e representam uma valiosa contribuição da pesquisa no mapeamento de estruturas geológicas da região.

Como dito anteriormente, o Domínio Carajás apresenta lineamentos descontínuos anastomosados, em escala regional, com direção preferencial WNW-ESE, por vezes NW-SE e E-W, observados por Holdsworth e Pinheiro (2000); Veneziani (2004); Vasquez e Rosa-Costa., (2008) e Pinheiro, (1997). Portanto, a extração de lineamento através do estéreo-par (Fig. 5.1) mostra uma correspondência com relação aos dados de falhas e fraturas regionais presentes na literatura, especialmente aquelas com direção NW-SE e WNW-ESE.

As estruturas fotointerpretadas através da geração do estéreo-par, em sua maioria, orientadas em uma direção WNW-ESE, por vezes E-W e NE-SW, possuem as mesmas orientações em relação às estruturas mapeadas pela empresa BVP Engenharia (sob contrato com a Vale S.A.), embora a geometria deste mapeamento seja sinuosa comparada à das estruturas fotointerpretadas, como é ilustrado na Figura 5.1. Da análise desse mapa, fica evidente que há uma complementaridade entre as fraturas fotointerpretadas e os falhamentos desse mapeamento de detalhe, inclusive com a representação, em ambos os estudos, das três principais direções estruturais: WNW-ESE, NE-SW e E-W.

O mesmo mapeamento apresenta um mapa com informações geológicas e geomecânicas em escala de 1:2000 da cava da mina N5E. A Figura 6.1 contém o Mapa Litogeomecânico da cava da Mina N5E. Observa-se, inicialmente, que as rupturas distribuem-se por praticamente todos os tipos litológicos, atingindo, inclusive, áreas de canga química, indicando a propagação em superfície de estruturas mais profundas, como pode ser observado na Figura 6.1 em áreas com retângulos verdes. Em alguns casos, essas rupturas posicionam-se no limite entre diferentes litologias, como exemplificado na mesma figura em áreas delimitadas por círculos brancos. Nos exemplos assinalados, o contato é sempre entre a Máfica Decomposta Média e a Hematita Fortemente Laminada.

De modo análogo às informações geológicas, o mapa também traz informações a respeito da qualidade geomecânica das rochas. Na mesma figura, pode-se perceber a correlação espacial entre as fraturas fotointerpretadas e classes temáticas (Boa, Muito Boa, Ruim e Muito Ruim). As fraturas se comportam de duas maneiras distintas: As distribuídas com direções NW-SE ou WNW-ESE predominam na classe Ruim, que é a de maior distribuição espacial na cava N5E; ao passo que as estruturas de orientações NE-SW predominam na classe Muito boa, este último conjunto de fraturas está também associada à rocha Máfica Sã. As áreas assinaladas de círculos brancos na Figura 6.1 também mostram que as fraturas sempre estão em contato com a Classe Muito Ruim. Figura 6.1 - Fraturas fotointerpretadas superpostas ao mapa litológico da cava N5E (BVP Engenharia 2011), com círculos realçando contatos litológicos por estruturas e retangulos realçando estruturas profundas. Imagem de fundo: GeoEye Pancromática de 01/julho/2012





A Figura 6.2 mostra a integração dos dados do processamento DInSAR-TS para a estação chuvosa (Figura 6.2A) e seca (Figura 6.2B) juntamente com as fraturas fotointerpretadas e o mapa geomecânico, sobrepostas a uma imagem GeoEye pancromática. Inicialmente, nota-se a diferença da quantidade de informação entre as duas estações, principalmente na região sul e noroeste da cava, onde pode-se perceber maior quantidade de informação para a estação seca. Isso ocorre devido à influência da precipitação, com uma mudança nas características de retroespalhamento do alvo. Para as áreas ao redor da mina, a falta de

coerência está principalmente associada à presença de vegetação. Podese perceber que a área, em geral, se apresenta estável, uma vez que, em maior parte, a coloração varia de verde e amarelo, para ambas as imagens. As exceções referem-se às áreas em vermelho destacadas em círculos na região oeste e norte da mina N5E no período seco e chuvoso. A partir da análise desta imagem, pode-se perceber, em áreas demarcadas com círculos brancos, que nos locais de maiores deformações de ambas as estações, há presença de fraturas fotointerpretadas na direção de deformação regional (WNW-ESSE e E-W) e os dois locais fazem contato com a classe geomecânica Ruim. Na região norte da cava, em ambas as estações, há evidências de subsidência. pela coloração laranja/avermelhado. Estes locais. evidenciados com círculos marrons, fazem contato com as classes geomecânicas Ruim e Muito Ruim e ficam próximos da área mapeadas como aterro (locais onde ocorre subsidência normal devido à acomodação de material sedimentar depositado).

Figura 6.2 - Integração dos dados do processamento DInSAR-TS para a estação chuvosa (A) e seca (B) juntamente com as fraturas fotointerpretadas e o mapa geomecânico, sobrepostas a uma imagem GeoEye pancromática.



Fonte: Produção do autor.
Em relação ao processamento PSI (Figura 6.3), houve uma grande diferença no número de pontos em relação aos dois conjuntos de imagens, devido à quantidade de chuva na estação chuvosa, o que provoca um aumento na descorrelação temporal em função da alteração da constante dielétrica dos alvos, o que influencia a redução da coerência interferométrica. A distribuição de PS não foi homogênea, uma vez que não houve PS em áreas de vegetação (baixa coerência), enquanto a detecção de pontos foi muito boa nas áreas de mineração (instalações da mineração e infraestruturas relacionadas). Isto é devido à baixa coerência interferométrica das áreas de vegetação.

Os resultados do processamento PSI mostraram que a maior parte da área era estável durante o período de cobertura do TSX-1 (regiões esverdeadas da Figura 6.3). Os valores acumulados obtidos em LoS que expressam subsidência estão dentro dos limites esperados para uma operação a céu aberto dessa dimensão. Os maiores valores de deslocamento de subsidência foram identificados ao norte da cava, evidenciado na imagem em círculos marrons, em uma área geologicamente mapeada como aterro, o que justifica um maior deslocamento devido à acomodação material ao longo do tempo. Essa região de aterro foi mais bem delimitada na abordagem PSI, em relação ao DInSAR-TS. Na parte oeste da cava, foram identificados valores de subsidência expressivos, representados por círculos brancos na Figura 6.3, para ambas as estações. Estes são locais onde foram identificadas estruturas fotointerpretadas, estando espacialmente associados à estruturas de orientação NW-SE e E-W, além de possuir contato com a classe geomecânica Ruim.

113

Figura 6.3 - Integração dos dados do processamento PSI para a estação chuvosa (A) e seca (B) juntamente com as fraturas fotointerpretadas e o mapa geomecânico, sobrepostas a uma imagem GeoEye pancromática.



Fonte: Produção do autor.

Foram comparadas as informações do PSI e o mapa geomecânico da mina N5E em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software Arcgis, a fim de explorar as relações espaciais. A Tabela 6.1 mostra que a maior quantidade de PS foi associada às classes geomecânicas das maiores áreas, mas não necessariamente com as maiores densidades (classe IV). A maior densidade de pontos é a classe I (Boa), que está relacionada a regiões menos intensas em relação às atividades de exploração. As regiões com atividades de exploração mais intensas (classes II e III) apresentaram menor densidade de pontos, tanto para a estação seca quanto para o conjunto de imagens da estação úmida. Isto pode ser explicado pelo fato de que estas áreas apresentam uma maior remoção de material, causando uma maior descorrelação temporal entre as imagens e, consequentemente, diminuindo a coerência interferométrica, ou associado a uma taxa de deformação muito alta, além do limite de sensibilidade da técnica que é λ / 4 vezes o número de λ (igual a 3,1 cm).

Classo		Esação Seca		Estação Chuvosa	
Geomecânica	Área (Km²)	Número de PS	PS/Km ²	Número de PS	PS/Km ²
I- Boa	0,07	3.386	48.371	3.384	48.342
II- Ruim	0,41	4.020	9.805	4.016	9.795
III- Muito Ruim	0,19	1.171	6.163	1.169	6.152
IV- Muito Boa	0,23	2.836	12.330	2.835	12.326

Tabela 6.1.Relação entre os pontos persistentes (PS) e classes geomecânicas para a mina N5E.

Fonte: Produção do autor.

Há uma ausência geral de PS e de informações do DInSAR-TS, para ambas as estações (Figuras 6.2 A/B e 6.3 A/B) na porção oeste dos taludes da mina N5E, uma vez que esta estrutura sintética sofreu intensas mudanças de superfície devido à operação de mineração em curso, expressa pela baixa coerência. Outro fato importante que pode ser responsável por esta falta de PS neste local em ambos os conjuntos de imagens é a qualidade geomecânica das rochas locais, que normalmente é classificada como Ruim e Muito Ruim, que também expressa baixa coerência (como mostrado na Figura 6.4), o caso foi exemplificado com o processamento do IPTA na estação seca (Fig. 6.4 A). Além desta região ter diversas estruturas fotointerpretadas na direção NW-SE (orientação das maiores deformações regionais existentes na literatura) em contato com a rocha Máfica Decomposta Média (associada à classe geomecânica Ruim) e a Hematita Fortemente Laminada (associada à classe geomecânica Muito Ruim).

Figura 6.4 Localização da ausência de PS da estação Seca (A) na parte oeste da cava da mina N5E integrados ao mapeamento geológico, geomecânico e as fraturas fotointerpretadas, sobrepostas a uma imagem GeoEye pancromática (B).





A estabilidade apresentada através da validação dos resultados no item 5.3, deve-se ao fato de que a mineração em N5E não é muito ativa, comparada com as demais minas do PMC (N5W, N4E, N4W), como já foi mencionado, principalmente na porção leste do poço, onde os prismas foram colocados, como mostrado na Figura 6.5-B. Especificamente o prima 3, evidenciado por círculo branco na imagem, está localizado em um local geologicamente mapeado como Canga de Minério (Figura 6.5-B), que cobre o minério de ferro e é formado por blocos de hematita (duro e semi-duro) cimentado por óxidos hidratados de ferro. Este tipo de rocha é muito dura; em função disso, é normal esperar que não haverá grandes

deformações em sua superfície. Ao contrário de locais mapeados como aterro, que, como mencionado anteriormente, é a litologia com as maiores deformações, devido à acomodação de material.

Figura 6.5 Localização do prisma 3 com os PS da estação Seca (A) integrados ao mapeamento geológico, sobreposto a uma imagem GeoEye pancromática (B).



Fonte: Produção do autor.

As taxas de deformação detectadas para o período seco, tanto no DInSAR-TS, quanto no IPTA, foram maiores em relação ao período chuvoso. Esta variação das taxas de deformação pode ser explicada porque no período da seca há uma maior deposição e compactação (recalque) de material nas pilhas de estéril e nos taludes de cava devido à perda de água e assim, uma maior taxa de deformação deve ser detectada. Este fato também foi observado no trabalho de Pinto et al. (2015).

Além disso, é possível observar que a quantidade de PS e informação do DInSAR-TS na porção central da mina N5E é praticamente nula. Segundo o relatório interno da Vale S.A., é nessa porção que ocorre a surgência de água, contribuindo para a perda de coerência e consequentemente para a

redução do número de PS. A surgência ocorre nas fraturas da Hematita Fortemente Laminada (HF), unidade hidrogeológica dominante na área.

Com intuito de comparar as duas técnicas interferométricas, foram gerados gráficos das medidas de deformações do DInSAR-TS, IPTA e dados topográficos de campo, no ponto de validação do prisma 2 (Figura 6.6). De acordo com os gráficos, para ambas as estações, o desvio padrão foi maior para a medição em campo, em relação às técnicas interferométricas (Tabela 6.2). E o desvio padrão do DInSAR-TS foi maior em relação ao IPTA, também em ambas as estações (Tabela 6.2).

Tabela 6.2.Desvio padrão das medidas de deformações do DInSAR-TS, ITPA e dados topográficos de campo, para as estações chuvosa e seca.

	Desvio Pradrão				
	DInSAR-TS	IPTA	Def. de Campo		
Estação Chuvosa	0,427	0,280	0,459		
Estação Seca	0,400	0,385	0,512		

Fonte: Produção do autor.

Figura 6.6 Localização do prisma 2 com os PS da estação Seca. Ao lado os gráficos de compração da deformação medida em campo com o processamento do DInSAR-TS (A) e do IPTA (B).



Fonte: Produção do autor.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, o potencial e as limitações da análise integrada SAR para monitoramento de deformações de superfície de estruturas mineiras da mina N5E em Carajás foram demonstrados. Um conjunto de 33 imagens TSX-1 foi analisado e técnicas diferentes de processamento de dados SAR foram combinadas de modo a extrair a máxima informação sobre condições de estabilidade e de mudanças na superfície.

As técnicas de interferometria SAR forneceram uma visão sinóptica dos processos de deformação que atuam no complexo minerador. Os mapas de deformação mostraram que a maior parte da mina a céu aberto N5E esteve estável sem detecção de deformações relevantes durante o período de recobrimento de imagens TSX-1. Por sua vez, taxas de deformação elevadas foram detectadas em locais específicos na parte externa da cava da mina N5E. Além disso, a maior quantidade de PSs na mina N5E foi associada com classes geomecânicas de baixa qualidade.

A utilização independente de subconjuntos de imagens sazonais (seca e chuvosa) mostrou ser uma boa alternativa de processamento interferométrico, uma vez que foi observada que a precipitação influencia no resultado final das técnicas interferométricas. Assim, as taxas de deformação detectadas para o período seco, tanto no DInSAR-TS quanto no PSI, foram maiores em relação ao período chuvoso.

De acordo com a validação estatística, foi comprovado que as análises SAR forneceram dados compatíveis com técnicas de monitoramento de medição em campo, consideradas precisas.

A integração da análise SAR com dados geológicos, geomecânicos e estereoscópicos forneceu informações valiosas na interpretação da deformação regional.

No que se refere a limitações da abordagem integrada SAR, levando-se em conta que as técnicas dependem de uma sequência de aquisições, as informações obtidas não são de tempo real e sua efetividade é limitada para áreas mostrando baixa coerência, tais como superfícies de mudanças intensas no tempo.

Esta pesquisa demonstrou que as técnicas DInSAR-TS e PSI podem ser utilizadas para monitorar deformações de superfície em ambiente de mina a céu aberto, em um ambiente de floresta tropical úmida (Amazônia), fornecendo informações úteis para o planejamento e avaliação de riscos em mineração.

Para trabalhos futuros recomenda-se o uso de sensores com menor tempo de revisita ou que opere em comprimento de onda maior, a fim de minimizar erros devido à descorrelação temporal. Recomenda-se também a utilização de conjuntos de imagens de visadas opostas, para minimizar os efeitos de sombra e foreshortening, bem como permitir calcular a componente vertical de deformação, o que tornaria o resultado mais robusto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. The upper Precambrian of South America. **Bol. Inst. Geoc**., USP, v. 7, v. 45-80, 1976.

ALMEIDA F.F.M. Tectonic map of South America 1:5.000.000. **Explanatory note**. Brasília, DNPM/CGMW/Unesco1978. 23p.

ATKINSON, L.C. The role and mitigation of groundwater in slope stability. In: HUSTRULID et al. (Eds.). **Slope stability in surface mining**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), 2000. p. 89-96.

AZEVEDO, A.A.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Águas subterrâneas. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p.111-130.

BARBOSA, G. V.; RENNÓ, C. V.; FRANCO, E. M. L. Geomorfologia In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. Projeto RADAMBRASIL. **Folha SA.22-Belém**; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1974. p. 1-36. (Levantamento dos Recursos Naturais, 5.)

BEISIEGEL, V. R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W., TREMAINE, J.W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 3, p. 215-242, 1973.

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms. **IEEE Transactionson Geoscienceand Remote Sensing**, v. 40, p. 2375–2383, 2002. BRITO, S. Os taludes da mineração: importância e riscos. Workshop
II:Geotecnia e Hidrogeologia Aplicadas à Mineração. Congresso
Brasileiro de Mineração, 2011.

BVP Engenharia **Mapeamento litoestrutural e litogeomecânico da Mina N5E**. 2011. 76p. VL 070-10-E-CA-RT-03-102-00. Relatório interno da Vale.

COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. Investigating landslides with spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. **Engineering geology**, v. 88. p.173-199, 2006.

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.

CONSTANTINI M. A novel phase-unwrapping algorithm based on network programming. IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., v.36, n. 3, p. 813-820, 1998.

COSTANTINI. F.; MOURATIDIS, A.; SCHIAVON, G.; SARTI, S. Advanced InSAR techniques for deformation studies and for simulating the PS assisted calibration procedure of Sentinel-1 data: case study from Thessaloniki (Greece), based on the Envisat/ASAR archive; **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 4, 2016.

Coutinho, M. G. N. **Província mineral do Tapajós**: geologia, metalogenia e mapa previsional para Ouro em SIG. Rio de Janeiro : CPRM, 2008. 402p.

CROSETTO, M.; CRISPA, B.; BIESCAS, E.; MONSERRAT, O.; AGUDO, M.; FERNANDES, P. Land deformation monitoring using SAR interferometry: state-of-the-art. **Photogrammetr fernerkundung geoinformation**, v. 6, p. 497-510, 2005. DALLEMAND, J.F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R.K.; SCHUMANN, R. radar imagery: theory and interpretation lecture notes. Rome: FAO, 1993. 103p.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. In: PANAM. CONF. SMFE, 4., 1971, San Juan, Porto Rico. **Proceedings...** Porto Rico, 1971.

DEHLS, J. **Permanent scatterer InSAR processing**: forsmark, Swedish nuclear fuel and waste management Co.. Stockholm Sweden: SKB, 2006. 34p. (SKB Rapport R-06-56).

Departamento de Produção Mineral (DNPM). **Informe Mineral 2°/2015. Julho-Dezembro de 2015**. DIPLAM (Diretoria de Planejamento e de Desenvolvimento da Mineração), 2015.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRALISEIRODE GEOLOGIA, 35., 1988. **Anais...** São Paulo: SBG, 1988. p. 10-54.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.; MASSONNET, D. In: FLETCHER, K. (Ed.). **InSAR principles**: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation - Parts A, B and C. Netherlands: ESA, 2007.

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 unsing permanent scatterers in differential SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2202-2212, 2000.

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

SYMPOSIUM, 1999, Hamburg, Germany. **Proceedings...** IEEE, 1999. p, 1528-1530.

FIELDING, E. J.; BLOM, R. G.; GOLDSTEIN, R. M. Rapid subsidense over oil fields measured bt SAR interferometry. **Geophysical Research Letters**. v. 25, n.17, p.3215-3218, 1993.

GAMA, F. F.; CANTONE, A.; SANTOS, A. R.; PASQUALI, P.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; SILVA, G. G. Monitoring subsidence of waste piles and infrastructures of active open pit iron mine in the Brazilian Amazon region using sbas interferometric technique and TerraSAR-X data. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), Milan, Italy. **Proceedings...** IEEE, 2015b.

GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; ASSIS,
L. M. Proposta de avaliação de técnicas de interferometria diferencial avançada (A-Dinsar) de dados SAR orbitais dos satélites TerraSAR-X e COSMO-Skymed no monitoramento de instabilidade de minas de ferro a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero-MG. In: SIMPÓSIO
BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João
Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015a. p. 1539-1546.
Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM48UL>. Acesso em: 27 mar.
2017.

GE, L.; CHANG, H.; RIZOS, C. Mine subsidence monitoring using multisource satellite SAR images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 73, p. 259–266, 2007

GENS, R.; VAN GENDEREN, J.L. SAR interferometry – issues, techniques, applications. International Journal of Remote Sensing. v.17. p. 1803-1835, 1996.

GIBBS, A.K.; WIRTH, K.R.; HIRATA, W.K. OLSZEWSKI Jr., W.J. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v.16, n. 2, p. 201-211, 1986.

GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping .**Proceedings...**IEEE, v. 62, p. 763-768, 1974.

GUÉGUEN Y.; DEFFONTAINES, B.; FRUNEAU, B.; AL HEIB, M.; MICHELE, M.; RAUCOLES, D.; GUISE, Y.; PLANCHENAULT, J. Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin fromdifferential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France). Journal of Applied Geophysics, v. 69, p. 24–34, 2009.

GUPTA, R. P. **Remote sensing geology**. Berlin: Springer – Verlag., 1991. 356p.

HANSSEN, R.F. **Radar interferometry**: data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308p.

HERRERA, G.; TÓMAS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; DELGADO, J.; MALLORQUI, J.J.; DUQUE, S.; MULAS, J. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). **Engineering Geology**, v. 90, p.148-159, 2010.

HOEK, E.; READ, J.; KARZULOVIC, A.; CHEN, Z.Y. Rock slopes in civil and mining engineering. In: linternational Conference on Geotechnical and Geological Engineering- GEOENG 2000, 2000, Melbourne, Australia. **Proceedings...** Lancaster, PA. : Technomic Publishing Co., 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. 23, 2004.

HOLDSWORTH, R.; PINHEIRO, R.V.L. The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archean Carajás fault zone,

Amazon, Brazil. Journal of Structural Geology. v. 22, p. 1105–1123, 2000.

HUALLANCA R. E. Z. Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto. 2004. 115p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. 1 mapa, color., escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) / EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE/EMBRAPA, 1 mapa, color., 107 x 100 cm, escala 1:5.000.000. 2001.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: http://www.ibge.gov.br. Acesso em: 12 jan. 2016.

JOÃO, X. S. J.; TEIXEIRA, S. G.; FONCESA, D. D. F. **Geodiversidade do estado do Pará**: programa geologia do Brasil levantamento da geodiversidade. Belém: Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), 2013.

KLEES, R.; MASSONNET, D. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. **Geologie en Mijnbouw**. v.77. p. 161- 176, 1999.

KUMAR, V.; VENKATARAMANA, G.; HØGDA, K. A. Glacier surface velocity estimation using SAR interferometry technique applying ascending and descending passes in Himalayas. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, n.4, p. 545–551, 2011. doi:10.1016/j.jag.2011.02.004.

LEBERL, F. W. Radargrammetry. In: HENDERSON, F.; LEWIS, A. (eds.).
Principles & applications of imaging radar - manual of remote sensing.
3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. Cap. 4, p. 183-269.

LEE, H.; PARK, W., A new epipolarity model base on the simplified pushbroom sensor model. In : JOINT INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND EXHIBITION ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING, AND APPLICATIONS, 2002, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: ISPRS Commission IV, 2002. WG IV/6. LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (eds.) **Principles & applications of imaging radar –** manual of remote sensing. 3. ed. v. 2, Danvers, MA: John Wiley and Sons, Inc., 1998. p. 131-176.

MACAMBIRA, M. J. B.; LIMA, L. M.; PINHEIRO, R. V. L.; LIMA, F. D. Idades de Cristais Detríticos de Zircão da Serra dos Carajás, Pará; evidências sobre a formação da crosta. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., 2001, Belém. **Boletim de Resumos Expandidos**, São Paulo:: SBG, 2001. p. 72-75.

MASSONNET, D.; FEIGL, K. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. **Geophysical Research Letters**, v. 22. n. 12. p. 1537-1540, 1995.

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.

MEIRELES, E. M.; HIRATA, W.K.; AMARAL, A.F.; MEDEIROS FILHO,
C.A.; GATO, W. C., Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província
Mineral dos Carajás, Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE
GEOLOGIA, 31., 1984, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: SBG, 1984.
v.5, p. 2164-2174. MEIRELLES M.R. Geoquímica e metalogênese dos
jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão- Pará, Serra
dos Carajás. 1986. 150p. Dissertação de Mestrado em Geociências.
Brasília, UnB, 1986.

MÉRIC, S.; FAYARD, F.; POTTIER, E. A multiwindow approach for radargrammetric improvements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 10, p. 3803 - 3810, 2011.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS A. R.; GALO, M. G.; 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. Online. ISBN 0277-786X. DOI: <10.1117/12.2066886>. Disponível em: <<u>http://dx.doi.org/10.1117/12.2066886</u>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

NADER, A. S. Monitoramento de taludes via radar SSR como indicador chave de desempenho geotécnico integrado às atividades primárias da cadeia de valor mineral. 2013. 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica –USP, 2013.

NG, A.H.M.; CHANG, H.C.; GE, L.; RIZOS, C.; OMURA, M. Assessment of radar interferometry performance for ground subsidence monitoring due to underground mining. **Earths, Planets and Space**, v.61, p. 733–745. 2009.

NG, A.H.M.; GE, L.; ZHANG, K.; CHANG H. C.; LI, X.; RIZOS C.; OMURA, M. Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR – Southern highland coalfield in New South Wales, Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 7227– 7256, 2011.

NIEVINSKI, F. G. Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR). 2004. 88p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências Porto Alegre, 2004.

NOGUEIRA, A.C.R. Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás - Pará. 1995. 167p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geociências_ - Universidade Federal do Pará, Belém, 1995). 1995.

OLIVEIRA, C.G. Avaliação da informação planialtimétrica derivada de dados radarsat-2 e terrasar-x para produção de cartas topográficas na escala 1:50.000. 2011. 208 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.19.17.39-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<u>http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A54QKB</u>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

PARADELLA, W.R.; CECARELLI, I.C. F.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C. G.; OKIDA, R. Geração de modelos digitais de elevação através da radargrametria com imagens do satélite RADARSAT-1. São José dos Campos: Inpe, 2003. 81p. Processo FAPESP-PIPE 1999/06271-7, Segundo Relatório Científico da Fase II, 2003.

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

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; CAMARGO, P. O.; GALO, M.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G. Detecção e Monitoramento de estabilidade de taludes e deformações superficiais em mina a céu aberto através de técnicas avançadas de interferometria diferencial de radar: uma avaliação nas minas de ferro de Carajás (N4E, N4W, N5W) utilizando dados do Satélite TerraSAR-X. São José dos Campos: Inpe, 2015^a. Processo FAPESP 2010/51267-9. Terceiro Relatório (Final) Científico.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R. Radar interferometry in surface deformationdetection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia,** n. 64/6, p. 797-811, 2015b.

PARADELLA, W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J. C.; COLOMBO, D.; GAMA, F. F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A.; NOVALI, F., R.; CAMARGO, P. O.;

GALO, M.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G.; SILVA, A. 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. 2015c.

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

PINTO, C. A.; PARADELLA W. R.; MURA J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS A.
R.; SILVA, G. G.; HARTWIG M. E. Applying persistent scatterer
interferometry for surface displacement mapping in the Azul open pit
manganese mine (Amazonregion) withTerraSAR-X StripMap data.
Journal of Applied Remote Sensing, v. 9, id. 095978, 2015.

POLIDORI, L. Radar images in Photogrammetry. In: KASSER, M.; EGELS, Y. (ed.). **Digital photogrammetry**. Londres: Taylor & Francis, 2001. Cap. 1, p. 47-53.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R.The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar.**Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.

RAMOS. L. G.; MIRANDA, F.P.; TROUVÉ, E.; SOLER, L. Urban subsidence as a local response of amazonas river flooding observed by satellite SAR interferometry. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**. p. 628-631, 2014.

RANEY, R.K. Radar fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (eds). **Principles & applications of imaging radar** – manual of remote sensing. 3. ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

READ, J.; STACEY, P. **Guidelines for open pit slope design**. Australia: CSIRO publishing, 2009.

SABATER, J.R.; DURO, J.; ARNAUD, A.; ALBIOL, D.; KOUDOGBO, F.N.
Comparative analyses of multi-frequency PSI ground deformation measurements. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY
FOR OPTICAL ENGINEERING – SPIE, 2011. Prague, Czech Republic.
Proceedings... Prague: SPIE, 2011. v. 8179. p. 81790M - 81790-12M.
2011.

SABINS, F. F. **Remote sensing principles and interpretation**. 2. ed. New York: W.H. Freeman and Company, 1987. 449p.

SANTOS, J.O.S.; HARTMAN, L.A.; GAUDETTE, H.E.; GROVES, D.I.; MCNAUGHTON, N.J.; FLETCHER, I.R. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-PB and Sm-Nd geochronology. **Gondwana Research**. v. 03, n. 4, p. 453-488, 2000.

SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; VENEZIANI, P; MORAIS, M. C. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 29, n. 4, p. 627-632, 1999.

SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; PARADELLA, W. R.; MORAIS, M. C. **Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral**: aplicações. Sao Jose dos Campos: INPE, 2001. 103 p. Curso: radar aplicado ao mapeamento geológico e; prospecção mineral: aplicações; São José dos Campos - SP; 21 -26 de agosto de 2000. (INPE-8117-PUD/45). Disponível em:

<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GPBEv>. Acesso em: 11 mar. 2017.

SCHOBBENHAUS, C.; CAMPOS, F. Distribution of mineral deposits through geologic time in Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGIC CONGRESS, 27., 1984, Moscow.**Proceedings...** VNU Science Press, 1984. SHAKER, A. Satellite sensor modeling and 3D geo-positioning using empirical models. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 10, p. 282-295, 2008.

SILVA, G.G.; LIMA, M.J.C.; ANDRADE, A.R.F.; ISSLER, R. S.; GUIMARÃES, G. Geologia das folhas SB-22 Araguaia e parte SC-22 Tocantins, Projeto RADAMBRASIL, geologia, geomorfologia, solos e uso potencial da terra, Levantamento de Recursos Naturais, Rio de Janeiro: Radam Brasil, 1974. 143p.

STACEY, P. READ, J. **Guidelines for open pit slop design**. Australia: CSIRO publishing, 2009.

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.

TOFANI, V.; SEGONI, S.; AGOSTINI, A.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Use of remote sensing for landslide studies in Europe.Natural Hazards Earth System Science, v. 13, p. 299–309, 2013.

TOLBERT, G.E.; TREMAINE, J.W.; MELCHER G.C.; GOMES C.B. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposit, northern Brazil. **Economic Geology**, v. 66, p. 985-994, 1971.

TOUTIN, T.; GRAY, A. L. State-of-the-art of extraction of elevation data using satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000a.

ULABY, F. T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. Microwave remote sensing – active 160 and passive: from theory to applications. North Bergen, NJ: Book-Mart Press, 1986. v. 3, p. 1065-2162.

VALE S. A. **Mapeamento estrutural e litogeomecânico da mina N5E**. Outubro de 2011. Empresa BVP Engenharia. VANNUCCI, T. A. M. Bases técnicas de conhecimento em sistemas imageadores radar e imagens radar. Curso de Engenharia Cartográfica, UFPR. 1999.

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. 328p. Belém: CPRM, 2008.

VAZIRI, A.; MOORE, L.; ALI, H. Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines.**Natural Hazards**, v. 55. p. 510-512, 2010.

VENEZIANI, P., SANTOS, A.R., PARADELLA, W.R. A evolução tectonoestratigráfica 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. **Revista Brasileira de Geociências** (Brazilian Journal of Geoscience), v. 34, p. 67–78, 2004.

WEGMÜLLER, U.; WALTER, D.; SPRECKELS, V.; WERNER, C. Nonuniform ground-motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, p. 895-904, 2010.

WEGMÜLLER, U.; WERNER, C.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Multitemporal interferometric point target analysis. In: SMITS; P.; BRUZZONE; L. (eds.). **Analysis of multi-temporal remote sensing images**. Hoboken; N.J.: World Science, 2004. v. 3, p. 136-144.

WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Gamma SAR and interferometric processing software. In: ERS-ENVISAT SYMPOSIUM, 2000, Gothenburg; Sweden. 16-20 Oct. **Proceedings...** Gothenburg: ESA, 2000.

WOODHOUSE, I. H. Introduction to microwave remote sensing. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 370p.

ZEA HUALLANCA, R.E. **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**. 2004. 124p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP), 2004.

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

ZHANG, G.; FEI, W.; LI, Z.; ZHU, X.; LI, D. Evaluation of the RPC model for spaceborne SAR imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 6, p. 727-733, 2010.