



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 129

**USO DE LIDAR AEROTRANSPORTADO PARA MAPEAMENTO E
ANÁLISE ESTRUTURAL DE DEPÓSITOS FERRÍFEROS NA SERRA
SUL DE CARAJÁS, AMAZÔNIA**

Tese apresentada por:

FRANCISCO RIBEIRO DA COSTA

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro (UFPA)

BELÉM

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Costa, Francisco Ribeiro da, 1973-

Uso de lidar aerotransportado para mapeamento e análise estrutural de depósitos ferríferos na serra sul de Carajás, Amazônia / Francisco Ribeiro da Costa. – 2018

xii, 90 f. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Coorientador: Roberto Vizeu Lima Pinheiro

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2018.

1. Sensoriamento Remoto - Carajás, Serra dos (PA). 2. Radar óptico - Carajás, Serra dos (PA). I. Título.

CDD 22. ed.: 621.3678098115

Elaborado por
Hélio Braga Martins
CRB-2/698



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**USO DE LIDAR AEROTRANSPORTADO PARA
MAPEAMENTO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE DEPÓSITOS
FERRÍFEROS NA SERRA SUL DE CARAJÁS, AMAZÔNIA**

**TESE APRESENTADA POR:
FRANCISCO RIBEIRO DA COSTA**


**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOLOGIA**

Data de Aprovação: 29 /03 /2018


Banca Examinadora:



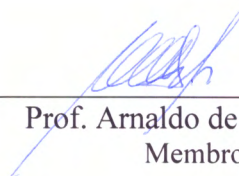
Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador)




Prof. Venerando Eustáquio Amaro
Membro – UFRN



Prof. Carlos Eduardo Mesquita de Barros
Membro – UFPR



Prof. Arnaldo de Queiroz da Silva
Membro– UFPA



Prof. Moacir José Buenano Macambira
Membro– UFPA

A minha família, em especial a Elisangela e Maria Eduarda pela paciência, perseverança e amor. Dedico a vocês esta Tese

AGRADECIMENTOS

- A Deus pelo dom da vida;
- A Universidade Federal do sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), pela licença para cursar o Doutorado
- A CAPES/PRODOUTORAL e a PROPIT pela concessão da bolsa de Doutorado;
- Ao PPGG pela infraestrutura concedida;
- Aos Professores José Augusto, Marcelo Cohen e Marcondes Lima pela avaliação da proposta de doutorado
- Aos meus amigos e orientadores Prof. Dr. Pedro Walfir e Prof. Dr. Roberto Vizeu pelo tempo dedicado à orientação;
- A minha esposa Elisângela pela ajuda e compreensão nos diversos momentos de dificuldade, um agradecimento ESPECIAL;
- Aos meus pais Raimundo e Terezinha pelo incentivo e apoio;
- Aos meus cunhados, cunhadas, concunhados e cuncunhadas (Gorete, Everaldo, Elivaldo, Deka, Neuza, Meuri) pelo incentivo e apoio “Logístico” em Tailândia e Concordia do Pará;
- Aos diversos amigos da UNIFESSPA;
- Aos amigos do ITV (Instituto Tecnológico Vale), Tasso Guimarães, Prafulla Kumar, Marcio Souza pela amizade e contribuição durante os trabalhos de campo.
- Aos amigos do LAIT, Paulo, Afonso, Wilson, Michele, Lourival, Glenda, Thiele entre outros, pelos momentos de descontração no nosso café da tarde e pela convivência sempre agradável;
- Aos amigos da FAGEO, Professores Ari, Aderson, Leonardo, Emídio, Gilmara, Valeria e Alice pelos momentos de descontração no nosso café da tarde e pela convivência sempre agradável;
- Aos amigos da VALE S.A, Daniele Freitas, Rafael Guimarães, Carlos Teles, Divino Fleury,
- Ao projeto PROCAV - LEVANTAMENTO GEOESPELEOLÓGICO DE CAVIDADES NATURAIS DA UNIDADE ESPELEOLÓGICA DE CARAJÁS, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS – PA, pelo apoio logístico e financeiro no desenvolvimento desta tese. Em nome do Prof. Dr. Antônio Emídio faço esse agradecimento extensivo ao Prof. Dr. Marivaldo Nascimento idealizador deste projeto.

- A empresa VALE S.A que forneceu as informações aqui utilizadas e financiou esta Tese;
- Ao LAIT (Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido) pelo uso da infraestrutura e licenças de softwares nesses anos de Trabalho
- A todas as pessoas que contribuíram de forma positiva para que esta tese tivesse êxito.

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”. (Roger Von Oech)

RESUMO

Esta pesquisa está centrada na definição de métodos para a utilização de dados de Light Detection And Range – LiDAR em mapeamento geológico estrutural. Na Região Amazônica, em particular nas formações ferríferas bandadas da Província Mineral de Carajás – PMC, a cobertura vegetal compromete a extração de informações estruturais a partir de dados de sensoriamento remoto ótico, pois ela mascara as feições geomorfológicas e estruturais que podem corresponder as estruturas geológicas. Esta tese abordou a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens de dados LiDAR, a partir de i) modelo de relevo sombreado – MRS do, o qual foi utilizado uma configuração com oito modos de iluminação com visadas distintas variando de 45° entre elas, para geração de mapas de alinhamentos; e ii) filtragem laplaciana em modelo de relevo sombreado – FLMRS em visadas multidirecionais. Em ambos os mapas resultantes foram observados os mesmos trends estruturais, NE-SW, NW-SE e secundariamente N-S e E-W. No entanto, o mapa gerado a partir da FLMRS em visadas multidirecionais apresentou uma melhor geometria da distribuição espacial dos lineamentos. Os resultados obtidos a partir da análise dos dados LiDAR foram comparados com dados estruturais coletados e analisados a partir do estudo da deformação do minério de ferro e nas rochas vulcânicas associadas na mina da Serra Sul de Carajás - S11D. A análise estrutural mostrou um único episódio refletindo encurtamento na direção E-W, com a instalação de dois sistemas de falhas, uma de direção NE-SW e a mais nova de direção NW-SE. Esta deformação é responsável pela geometria das rochas do platô S11D, formando uma sequência sinformal/antiformal com caimento para NE e SE acompanhando o e desses sistemas de falhas e com planos axiais mergulhando em alto ângulo para NW e NE formando dobras com padrões de interferência complexos. A laminação no minério de ferro preserva ainda estruturas primárias e não há evidências de milonitização pervasiva nestas rochas. Propõe-se um modelo deformacional para as rochas do Platô S11D relacionado a transpressão controlada pela Falha Carajás durante movimentos sinistrais regionais. A análise comparativa de mapas estruturais gerados com dados LiDAR aerotransportados e métodos manuais tradicionais foram realizados a partir do comparativo dos dois mapas. O cálculo e quantificação da dispersão das linhas de contorno estrutural em cada área a partir dos diferentes métodos mostrou um coeficiente de correlação que variou entre 0,91 e 0,93, sugerindo um bom grau de similaridade entre as estruturas mapeadas, embora haja variações na orientação e abundância nas linhas de contorno

estrutural. Em geral, os resultados demonstram a eficácia dos dados LiDAR aerotransportado para extrair informações estruturais detalhadas e precisas em terrenos tropicais, podendo ser utilizados para complementar o mapeamento estrutural baseado em dados de campo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; LiDAR; Carajás; S11D.

ABSTRACT

This research is focused on the definition of methods for the use of Light Detection And Range - LiDAR data in structural geological mapping. In the Amazon Region, in particular in the banded iron formations of the Mineral Province of Carajás - PMC, the vegetal cover compromises the extraction of structural information from optical remote sensing data, since it masks the geomorphological and structural features that can correspond the geological structures. This thesis addressed the application of digital image processing techniques of LiDAR data, from i) shaded relief model - MRS do, which used a configuration with eight lighting modes with different views ranging from 45° between them, to generation of alignment maps; and ii) laplacian filtration in shaded relief model - FLMRS in multidirectional visions. In both resulting maps the same structural trends, NE-SW, NW-SE and secondarily N-S and E-W were observed. However, the map generated from the FLMRS in multidirectional visions presented a better geometry of the spatial distribution of the lineaments. The results obtained from the analysis of LiDAR data were compared with structural data collected and analyzed from the study of iron ore deformation and associated volcanic rocks at the Serra Sul de Carajás mine - S11D. The structural analysis showed a single episode reflecting shortening in the E-W direction, with the installation of two fault systems, one NE-SW direction and the new NW-SE direction. This deformation is responsible for the geometry of the rocks of the S11D plateau, forming a sinformal / antiformal sequence with NE and SE trim along with these fault systems and with axial planes dipping at high angles to NW and NE forming folds with complex interference patterns. Lamination in iron ore still preserves primary structures and there is no evidence of pervasive milonization in these rocks. It proposes a deformational model for the rocks of the S11D Plateau related to transpression controlled by the Carajás Fault during regional sinistral movements. The comparative analysis of the structural maps generated with airborne LiDAR data and traditional manual methods were performed from the comparative of the two maps. The calculation and quantification of the dispersion of the structural contour lines in each area from the different methods showed a correlation coefficient that varied between 0.91 and 0.93, suggesting a good degree of similarity between the mapped structures, although there are variations in the orientation and abundance in the structural contour lines. In general, the results demonstrate the effectiveness of the airborne LiDAR data to extract detailed

and accurate structural information on tropical terrain and can be used to complement the field-based structural mapping.

Keywords: Remote Sensing; LiDAR; Carajás; S11D.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPITULO 1:

Figura 1.1 – (A) Imagem SRTM da região da Serra dos Carajás, com a espacialização dos depósitos de Ferro; (B) Localização do platô S11D onde o trabalho foi desenvolvido.	3
--	----------

CAPITULO 2:

Figura 2.1 – Províncias Geocronológicas do Craton Amazônico.	7
Figura 2.2 – Mapa geológico simplificado da província Carajás. A área de pesquisa está inserida na Bacia de Carajás dentro do contexto do Supergrupo Itacaiunas, especificamente no Grupo Grão Pará.	12
Figura 2.3 – Mapa geológico-estrutural simplificado da área do S11D na Serra Sul elaborado durante a pesquisa com os dados estruturais e a seção geológica sobre a Formação Carajás. Fonte: Mapa estrutural da área da mina do S11D confeccionado pelo autor, mapa geológico modificado de.	14

CAPITULO 3:

Figura 3.1 - Sistema LiDAR.	16
Figura 3.2 - Pulsos de retornos LiDAR.	18

CAPITULO 4:

Figura 4.1 - Mdt com visadas multidirecionais agrupadas em três visadas distintas: visada centrada em: a) 0 az (N, N45W e N45E), b) 90 az (E, N45E e N45W), c) 180 az (S45E, S e S45W), e d) 270 az (W, N45W e S45W), com exagero vertical de 2,5.	27
Figura 4.2 – Métodos utilizados para realce de lineamentos – a) modelo de relevo sombreado com paleta de tons de cinza e, em b) modelo de relevo sombreado com paleta de cores substituída pela paleta de cores Spectro Full Bright.	28
Figura 4.3 – Estrutura de ponderação do kernel de 3x3 pixels utilizados na filtragem laplaciana.	28

- Figura 4.4 a) imagem resultante do processo de filtragem laplaciana sobre relevo sombreado multidirecional, e a) imagem resultante do processo de filtragem laplaciana sobre relevo sombreado com paleta de cores Spectro Full Bright, **29**
- Figura 4.5 – Painéis de estruturas mapeadas nas rochas ferríferas. Dados estruturais coletados na pesquisa de campo ao longo de 8 painéis, plotados em diagrama de projeção estereográfica de igual área conforme indicado no mapa , as letras de a) a h) correspondem a localização dos dados dos estereogramas : a e b) bandamentos com dobras centimétricas, , c) Dobras tipo kink Bands, cortadas por falhas de direção NNE, d) Bandamentos em rocha ferrífera cortados por falhas NW-SE e NE-SW; e) Bandamentos em rocha ferríferas cortados por falhas NE-SW desenhando guirlandas de dobras, f) Transposição de Bandamento em rocha ferrífera pela ação de um conjunto de falhas de direção NE-SW , g) , Bandamentos em rocha ferrífera cortados por falhas NW-SE e NE-SW, h) rochas ferríferas e vulcânicas cisalhadas na direção NW-SE. **32**
- Figura 4.6 – a) Mapa de lineamentos gerado a partir da interpretação do Modelo de relevo sombreado, com a substituição da paleta de cores de tons de cinza, pela paleta Spectro Full Bright. b) Mapa gerado a partir das imagens LIDAR realçadas por filtros laplacianos com substituição da paleta de cores de tons de cinza, pela paleta Spectro Full Bright. Em c) e d) Diagrama de Rosetas em frequência absoluta mostrando a distribuição dos lineamentos em ambos os mapas analisados. Em e) e f) Diagrama de Rosetas em Comprimento absoluto mostrando a distribuição dos lineamentos em ambos os mapas analisados. **36**
- Figura 4.7 – Mapa de densidade de lineamentos derivados dos mapas de lineamentos gerados através de interpretação visual de Modelo de relevo sombreado e filtragem laplaciana de modelo digital de terreno derivado do LiDAR. **38**
- Figura 4.8 – Mapa mostrando detalhe das relações de truncamento das estruturas extraídas do MDT-LiDAR, em a) e em b) e demonstrado como se dá o cruzamento das estruturas de direção N-S, NW-SE e NE-SW..... **39**

CAPITULO 5:

- Figura 5.1 – a) jaspilito alterado, com bandamento definido por alternância entre bandas de opacos e bandas de chert; b) Alternância entre a banda de opacos e a banda

silicosa composta por chert e cristais de quartzo. As bandas apresentam-se dobradas. Nicóis cruzados(2.5x).45

Figura 5.2 – Mapa estrutural gerado a partir dos dados de campo, utilizando o método de interpolação de contorno estrutural, utilizando medidas estruturais.47

Figura 5.3 – Geometria da posição das rochas e do minério de ferro em perfil e planta na parte leste do platô S11D; a) Seção AB na parte oeste do platô mostrando o bandamento nas rochas ferríferas com direção NW-SE e mergulho alto cortado por falhas normais de direção NW-SE. b) Continuação da Seção AB onde se observa o bandamento com strike NE-SW com dobras e rotações produzidas por arrasto ao longo de falhas normais com direção NW-SE. c) projeção em planta dos perfis mostrando o comportamento da rocha ferrífera. Observar que a maioria das falhas normais estão concentradas na primeira faixa do perfil em a). d) Estereograma para 33 atitudes do bandamento na rocha ferrífera. Observar a dispersão de polos na parte sul da projeção em decorrência da deformação produzida pelas falhas normais. Localização na Figura 5.2.48

Figura 5.4 – Sistemas de dobras presentes na área do projeto S11D. a) Painel 01 - sistemas de dobras desenhando sinforme e antiforme em forma de M com eixo caindo para NE, b) detalhe dos sinforme e antiformes cortados por falha de direção NE-SW, c) Fotografia de detalhe do contido das dobras com a falha, d) Estereograma mostrando os elementos geométricos da dobra, e) Painel 02 - afloramento de minério de ferro dobrado, f) fotografia de detalhe, g) Estereograma mostrando os elementos geométricos do bandamento dobrado com eixo caindo para SE e plano axial com vergência para NE, h) mapa de localização dos Painéis analisados51

Figura 5.5 – Painéis de afloramentos construídos na área do Platô S11D. a figura mostra a variação dos padrões de dobramentos do minério de ferro na área pesquisada. a) bandamento pouco deformado apresentando dobras centimétricas com eixo caindo para NNE, b) dobras tipo kink bands cortadas por falhas/fraturas de direção NNE, c) dobras apertadas com pequeno ângulo interflancos seccionadas por falhas/fraturas de direção NE-SW, d) dobras fechadas seccionadas por falhas NE-SW, e) ZCDR com fragmentos de minério de ferro e rocha vulcânica de direção NW-SE, f) minério de ferro cortados por um conjunto de falhas de direção NE-SW e NW-SE, g) bandamento pouco deformado seccionados falhas/fraturas de

direção NW-SE, h) minério de Ferro desenhando dobras cortado por falha de direção NW-SE.....	52
Figura 5.6 – Espacialização dos setores estruturais na área do platô S11D.	56
Figura 5.7 – Diagrama de Rosetas para as direções de bandamento e de Lineamentos Rúpteis, observados na área estudada.....	57
Figura 5.8 – História da deformação das rochas na Serra Sul de Carajás. Modelo gerado no software Visible Geology, compilado com um algoritmo elaborado no Matlab...	59
Figura 5.9 – Geometria dos conjuntos de dobras centimétricas a métricas no platô S11D; a) Estereograma mostrando ao longo do platô a distribuição dos eixos das dobras e a distribuição dos planos axiais das mesmas onde é possível observar a faixa de distribuição dos planos ao qual são reconhecidos dois domínios; b) modelo de interferência de dobras, causado pela superposição de dois sistemas de dobras como resultado da atuação de dois sistemas de falhas, c) Afloramento na área de trabalho, na margem da lagoa do violão mostrando padrão de interferência de dobras.....	61
Figura 5.10 – Desenho esquemático mostrando a relação entre as principais estruturas na região do platô S11D e a estruturação geral da Bacia Carajás.	62
CAPITULO 6:	
Figura 6.1 Desvio Padrão Média Azimutal Simples,.....	69
Figura 6.2 Desvio Padrão Média Azimutal Ponderada.....	69
Figura 6.3 – Diagrama de rosetas dos mapas analisados, em a) Diagrama de Rosetas da frequência dos lineamentos do mapa de contorno estrutural baseado em dados de Campo, b) Diagrama de Rosetas da frequência dos lineamentos do mapa de contorno estrutural baseado em dados LIDAR.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Fonte de erros nas coordenadas tridimensionais LiDAR	19
Tabela 4.1 - Matriz de Correlação das frequências absolutas e Comprimento absoluto das direções dos lineamentos	37
Tabela 6.1 – Parâmetros estatísticos dos mapas de contorno estrutural elaborado a partir de metodologia distintas.....	67
Tabela 6.2 – Coeficientes de Correlação de Pearce dos mapas avaliados	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS – *Airborne Laser Scanner*

ALTM – *Airborne Laser Terrain Mapper*

AOL – *Airborne Oceanographic LiDAR*

ATM – *Airborne Topographic Mapper*

CE - Canga Estrutural

CM – Canga de Minério ():

CQ – Canga Química

DCC - Subdomínio Canaã dos Carajás

DEM – *Digital Elevation Model*

DS - Subdomínio Sapucaia

DSM – *Digital Surface Model*

DTM – *Digital Terrain Model*

EMQ – Erro Médio Quadrático

FFB – formações ferríferas bandadas

Ga – Giga Anos

GPS – *Global Positioning System*

INS – *Inertial Navigation System*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LiDAR – *Light Detection and Range*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de superfície

MDT – Modelo digital de Terreno

MOLA – *Mars Observer Laser Altimeter*

MRS – Modelo de Relevo Sombreado

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

PMC – Província Mineral de Carajás

PROCAV – Projeto de Levantamento Geoespeleológico da Unidade Geoespeleológica de Carajás, Província Mineral de Carajás

Rangefinder - telêmetro a laser

SAR – *Synthetic Aperture Radar*

SGB – Sistema Geodésico Brasileiro

SPRING – Sistema de Processamento de informações Georeferenciados

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

ZC – Zonas de cisalhamento

ZCDR – Zonas de cisalhamento Dúctil Rúptil

ZCR – Zonas de cisalhamento Rúptil

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPIÍGRAFE	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
CAPITULO 1 - ASPECTOS INTRODUTÓRIOS	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 ESTRUTURA DA TESE	3
CAPITULO 2 - GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL	6
2.1 GEOLOGIA REGIONAL	6
2.1.1 Domínio Carajás	8
2.1.1.1 Bacia Carajás	8
2.1.1.2 Sub Domínio Canaã dos Carajás.....	10
2.1.1.3 Sub Domínio Sapucaia.....	10
2.1.2 Domínio Rio Maria	11
2.2 GEOLOGIA LOCAL.....	12
CAPITULO 3 - SISTEMA DE LEVANTAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO <i>LIGHT DETECTION AND RANGING (LiDAR)</i>	15
3.1 FONTES DE ERRO	19
3.2 APLICAÇÃO	20
3.2.1 Meio ambiente	20
3.2.2 Mapeamento topográfico	21

3.2.3 Geologia	22
CAPITULO 4 - USO DE DADOS LiDAR AEROTRANSPORTADOS PARA MAPEAMENTO ESTRUTURAL DA ÁREA DA MINA DE FERRO DO S11D, SERRA DOS CARAJÁS, AMAZÔNIA.	23
4.1 INTRODUÇÃO	23
4.2 DADOS DE SENSORES REMOTOS	25
4.3 MÉTODOS	25
4.3.1 Mapeamento das estruturas de campo	25
4.3.2 Realce de alinhamentos estruturais dos dados LIDAR	26
4.3.2.1 Modelo de relevo sombreado do MDT-LiDAR	26
4.3.2.2 Filtragem Laplaciana sobre Modelo de Relevo Sombreado – (FLMRS)	28
4.3.3 Mapeamento de lineamentos	29
4.3.4 Análise e Validação de Lineamentos	30
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.4.1 Dados estruturais coletados em campo	30
4.4.2 Mapeamento estrutural a partir do LiDAR aerotransportado	33
4.4.3 Significância dos trends estruturais e suas implicações	38
4.4.4 Fatores que limitam o reconhecimento da geometria da trama estrutural	39
4.5 CONCLUSÕES	41
CAPITULO 5 - PADRÃO DE DEFORMAÇÃO EM ROCHAS FERRÍFERAS ARQUEANAS: EXEMPLO DA REGIÃO SUL DA SERRA DOS CARAJÁS, BORDA LESTE DO CRATON AMAZÔNICO. BRASIL.	42
5.1 INTRODUÇÃO	42
5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL	43
5.2.1 Metodologia	43
5.2.2 Resultados	44
5.2.2.1 Bandamentos do minério de Ferro	44
5.2.2.2 Lineação mineral	46
5.2.2.3 Zonas de cisalhamento (ZC) – Transposição	49

5.2.2.4 Dobras	49
5.2.2.5 Setores de deformação	53
5.3 DISCUSSÃO.....	57
5.3.1 Temporalidade dos episódios de deformação.....	57
5.3.1.1 Deposição da Bacia de Carajás	57
5.3.1.2 Inversão da Bacia Carajás	58
5.3.1.3 Instalação da ZCD – NE -SW – D1	58
5.3.1.4 Instalação da ZCR – NW-SE – D2	58
5.3.2 Indicadores cinemáticos	59
5.3.3 Implicações Gerais para a História geológica de Carajás.....	61
5.4 CONCLUSÕES	62
CAPITULO 6 - ANÁLISE COMPARATIVA DE MAPAS ESTRUTURAIS GERADOS A PARTIR DE LIDAR AEROTRANSPORTADO E MÉTODOS MANUAIS TRADICIONAIS: ESTUDO DE CASO NA MINA DE FERRO DO S11D, CARAJÁS, AMAZÔNIA.....	64
6.1 INTRODUÇÃO	64
6.2 METODOLOGIA.....	64
6.2.1 Mapa de contorno estrutural baseado em lidar	65
6.2.2 Mapa de contorno estrutural baseado em campo	65
6.2.3 Analise estatística de lineamentos.....	65
6.2.4 Comparação entre os dados estatísticos dos mapas avaliados.....	66
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6.3.1 Estatística dos mapas estudados	66
6.3.2 Parâmetros estatísticos	67
6.3.3 Coeficientes de correlação entre os mapas avaliados	68
6.3.4 Desvio padrão	68
6.3.5 Diagrama de rosetas	70
6.4 CONCLUSÃO	71
CAPITULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	72

7.1 USO DO LiDAR NO MAPEAMENTO ESTRUTURAL NA ÁREA DO PLATÔ S11D.....	72
7.2 PADRÃO DE DEFORMAÇÃO E A HISTÓRIA DA REGIÃO PLATÔ S11D	72
7.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS DE MAPEAMENTOS.....	73
REFERENCIAS.....	Erro! Indicador não definido.

CAPITULO 1 - ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

1.1 INTRODUÇÃO

A crosta terrestre, depósitos de ferro de idade pré-cambriana ocorrem associados à rochas tectonicamente deformadas, as quais exibem complexos padrões estruturais. Por exemplo, Greenstone Pilbara na Austrália (Hickman 2001); Grenstones Abitibi nos EUA (Luinstra & Benn 2001); Barbeton na África do sul (Ronde & Wit 1994; Lowe *et al.*, 1999) e; Kiruna na Suécia (Lindblom *et al.*, 1996); Simandou na República da Guiné (Cope *et al.* 2008); lago Superior nos EUA (Marsden 1977); Rio das Velhas e Quadrilátero Ferrífero no Brasil (Rosière & Chemale JR 2000) e Província Mineral de Carajás (Araújo & Maia 1991, Beisiegel 1982, Domingos 2003, Macambira 2003a, Tolbert *et al.* 1971, Paradella *et al.* 1994, 1997, Pinheiro & Holdsworth 2000a, Rosière *et al.* 2006, Veneziani *et al.* 2004). A complexidade envolvida nesses terrenos é em grande parte, devido suas idades e por sua forte associação com bacias tipo greenstone arqueanos/proterozóicas.

A prospecção de depósitos ferríferos em rochas bandadas enfrenta a dificuldade de entendimento dos padrões de deformação nas suas diferentes escalas. Isto porque, mapas estruturais de grandes áreas, com dificuldades de acesso, poucos afloramentos e densa cobertura vegetal, são pouco resolutivos no entendimento estrutural de depósitos minerais, acarretando planejamentos e gastos exploratórios desnecessários. O reconhecimento de feições estruturais em escala local e regional usando dados geoespaciais de alta resolução fornece informações referenciadas pelos trabalhos de campo que permitem gerar mapas geológicos e estruturais mais eficientes para uso na pesquisa mineral (Grebby *et al.* 2011).

No Brasil, vários pesquisadores têm investigado os depósitos de Ferro pré-cambrianos na Província Mineral de Carajás (PMC) e no Quadrilátero Ferrífero (QF). Na PMC, os estudos mais relevantes tiveram início com o clássico trabalho de Tolbert *et al.* (1971), intitulado “*The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil*” publicado na *Economic Geology*, estendendo-se até os dias atuais, onde podemos destacar o trabalho de (Silva 2010) sobre “*Aplicação de dados SAR polarimétricos do sensor aerotransportado R99B para mapeamento de crostas lateríticas do platô mineralizado em ferro de NI (Carajás - Pa)*”.

Na Região Amazônica, em particular nas formações ferríferas bandadas da PMC, a cobertura vegetal compromete a extração de informações estruturais a partir de dados de sensoriamento remoto ótico, pois ela mascara as feições geomorfológicas e espectrais sutis que podem corresponder a estruturas geológicas. O uso do LiDAR de alta resolução espacial irá realçar de modo significativo às estruturas e feições geológicas contribuindo para uma melhor compreensão do quadro geológico das formações ferríferas da PMC. O uso de sensores remotos de alta resolução espacial tem demonstrado o seu potencial para geração de mapas geológico em aplicações de mineração, de acordo com as características e aplicações que cada um dos sensores apresenta (Grebby *et al.* 2011, Grohmann & Miliaresis 2013, Paradella & Cheng 2013).

O sistema LiDAR consiste de um transmissor a laser, e um receptor que converte a energia emitida e recebida em impulsos elétricos (Baltsavias 1999). Tem a finalidade de medir a distância entre um sensor e um alvo específico, onde a distância do objeto é determinada com base no tempo gasto pelo pulso transmitido ao alvo e o seu retorno. A diferença de tempo entre os sinais emitidos, são transformadas em medida de elevação que integradas definirão o modelado do relevo. Uma das principais características do LIDAR são os diferentes sinais de retorno, em regiões de densa cobertura florestal. Essa característica é fundamental no mapeamento da superfície do terreno (Wehr & Lohr 1999).

A região da Serra dos Carajás, dividida em dois grandes domínios morfoestruturais, Serra Norte e Serra Sul, representa um excelente laboratório para o uso de sensores remotos de alta resolução e de diferentes técnicas de processamento de imagens com vistas ao mapeamento geológico de depósitos minerais ferríferos em áreas tropicais. A região é conhecida por possuir depósitos gigantes de minério de Ferro, muitos ainda por serem geologicamente caracterizados, e carentes de informações geológicas prospectivas em escala de detalhe. Usar dados de sensores remotos orbitais e aerotransportados para mapear o terreno sem a interferência da cobertura florestal é um desafio primordial para o avanço do conhecimento geológico dessa extensa região. Alia-se ainda o fato de apresentarem quase sempre deformações tectônicas complexas, capazes de potencializar as dificuldades de operacionalização de sua prospecção e implantação de lavra.

Assim, o objetivo desta Tese é avaliar a utilidade de dados LiDAR de alta resolução espacial no mapeamento estrutural de rochas ferríferas em escala de detalhe.

A área de estudo é apresentada na Figura 1.1, tomando como referência a Serra Sul de Carajás, situada na PMC.

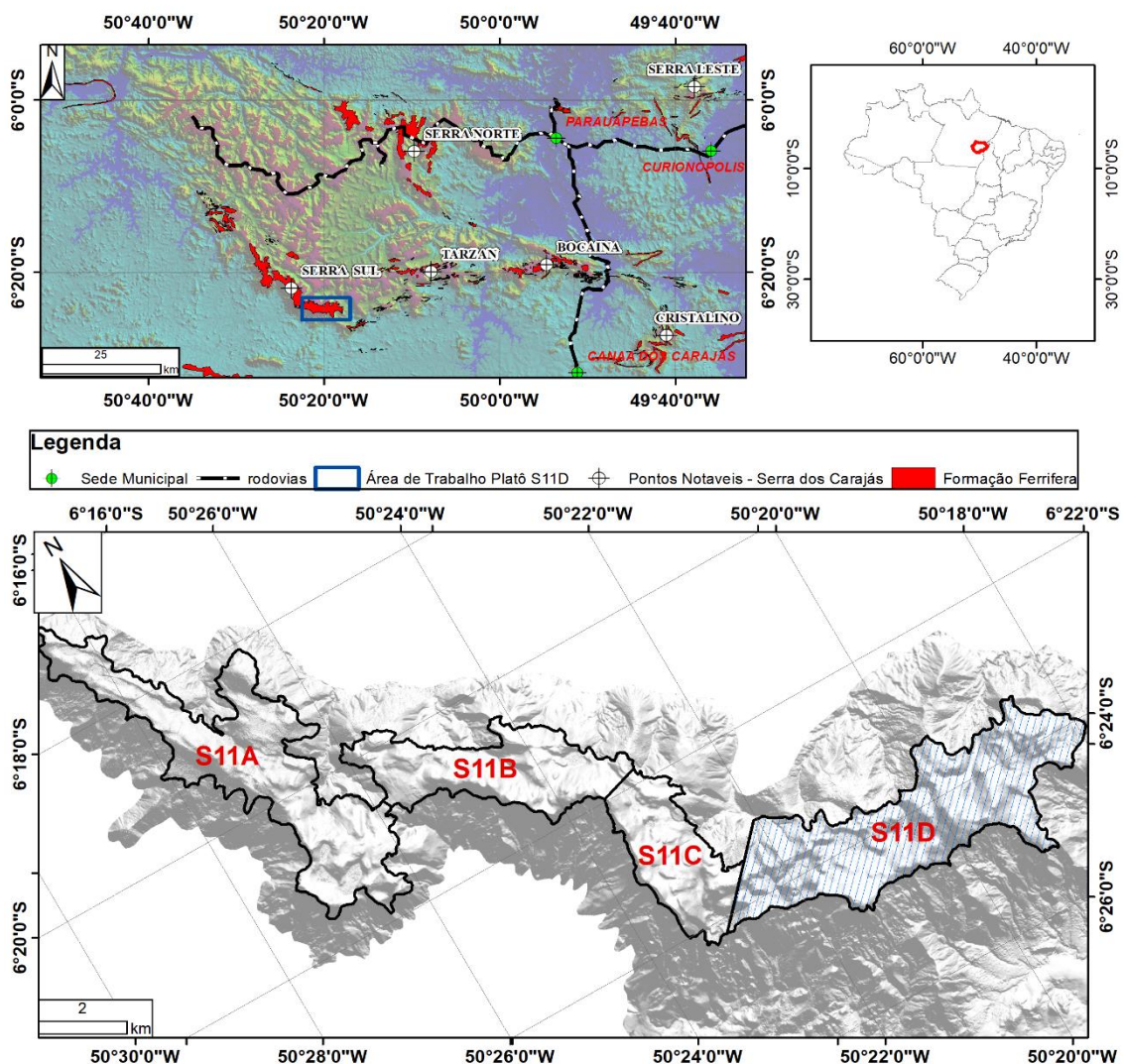


Figura 1.1 – (A) Imagem SRTM da região da Serra dos Carajás, com a espacialização dos depósitos de Ferro; (B) Localização do platô S11D onde o trabalho foi desenvolvido

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Esta seção apresenta a estrutura da tese e um resumo do conteúdo de cada capítulo. O capítulo 1 apresenta os aspectos introdutórios, o problema a ser investigado e a estruturação da tese. O capítulo 2 apresenta o contexto geológico regional e local. O capítulo 3 apresenta uma abordagem geral sobre o sistema LiDAR. Os capítulos principais apresentam os resultados referentes ao uso de dados LiDAR em mapeamento estrutural (capítulo 3), seguindo com um artigo sobre a Deformação da área baseado em dados de campo (Capítulo 4) e no Capítulo 5, uma análise comparativa é realizada entre

os dois mapas estruturais elaborados. E finalizando com o capítulo 6 ressaltando as principais conclusões da pesquisa.

Capítulo 1

Este capítulo apresenta os aspectos introdutórios, o problema a ser investigado e a estruturação da tese. E tese é composta de 7 capítulos, estruturados de forma contínua iniciando com a abordagem do problema a ser investigado até as conclusões e considerações finais.

Capítulo 2

O capítulo 2 apresenta a descrição da Geologia Regional e da Geologia Local. Onde são abordados os aspectos descritivos e genéticos das rochas que compõe o complexo da PMC.

Capítulo 3

O capítulo 3 apresenta um apanhado geral sobre a tecnologia LiDAR, descrevendo sucintamente a forma de obtenção dos dados LiDAR e as principais aplicações dos produtos gerados por essa tecnologia.

Capítulo 4

Este artigo descreve a análise do uso de dados LIDAR aerotransportados para mapeamento estrutural da área da mina de ferro do S11D, Serra dos Carajás, Amazônia. Neste capítulo abordamos os métodos necessários para a construção de um mapa de lineamentos estruturais baseados em dados LiDAR. Nestes termos os dados MDT-LIDAR Aerotransportado são a mais nova ferramenta de Sensoriamento Remoto de alta resolução, cujos produtos derivados podem auxiliar grandemente no reconhecimento de feições estruturais sutis em áreas com poucos afloramentos, com dificuldade de acesso e com cobertura vegetal considerável, como é o caso da Amazônia. Neste estudo foram utilizados dados LIDAR de alta resolução (1m), ao qual foram aplicadas duas técnicas de realce visando realçar as sutis feições estruturais na área de trabalho. Além disso, o mapa gerado neste capítulo será utilizado na análise comparativa descrita no capítulo 5.

Capítulo 5

Este artigo descreve o padrão de deformação em rochas ferríferas arqueanas. A proposta estrutural elaborada neste estudo é baseada em informações de campo. Neste capítulo propõe-se um modelo deformacional para as rochas do Platô S11D relacionado a transpressão controlada pela Falha Carajás durante movimentos sinistrais regionais

que geraram as estruturas geológicas no minério de ferro. O quadro estrutural proposto e a história tectônica para a região são construídos utilizando observações de campo e medidas da trama estruturais planares e lineares de afloramentos rochosos; O conjunto de dados integrado é usado para sustentar um modelo estrutural que explica o caráter deformacional dominante e a evolução da tectônica na área. Além disso, o mapa gerado neste capítulo será utilizado análise comparativa descrita no capítulo 6.

Capítulo 6

Este artigo descreve uma análise comparativa de mapas estruturais gerados a partir de LIDAR aerotransportado e métodos manuais tradicionais, descritos respectivamente nos capítulos 3 e 4 desta tese. O objetivo foi calcular e quantificar a dispersão das linhas de contorno estrutural em cada mapa elaborado.

Capítulo 7

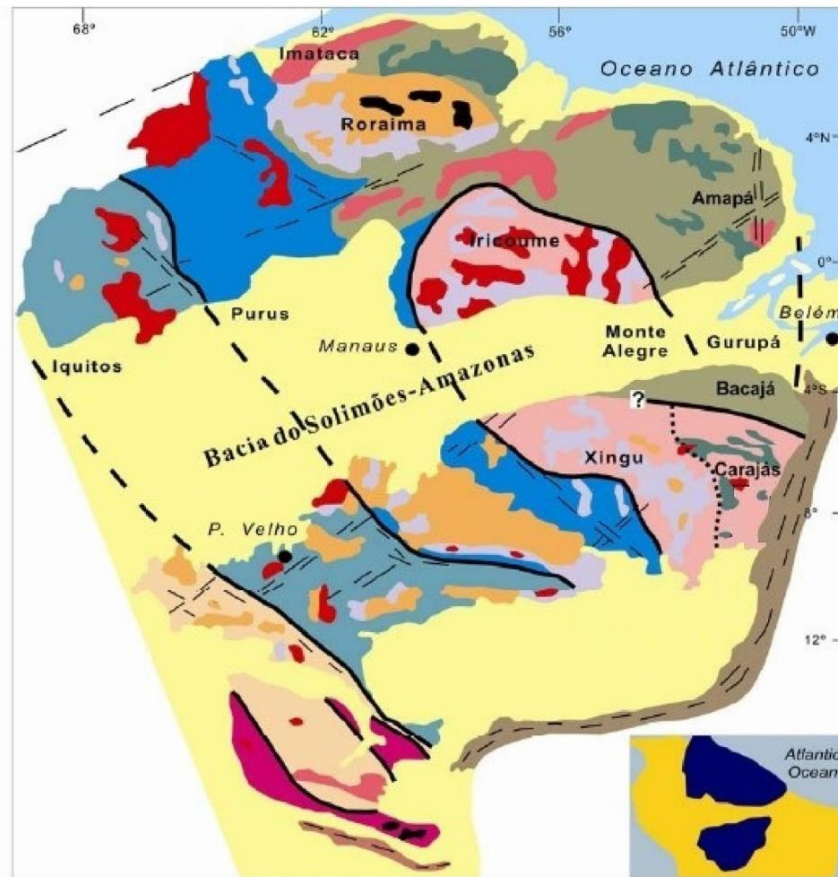
Apresenta um resumo das principais considerações e conclusões do estudo.

CAPITULO 2 - GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

O Platô S11D, na Serra dos Carajás, está inserido na borda leste do Craton Amazônico, na região central da Plataforma Sul-Americana (Figura 2.1). O Craton Amazônico é resultado da aglutinação de blocos continentais ligados por cinturões paleoproterozoicos, ocorrida em torno de 2.2 e 1.95Ga (Tassinari & Macambira 2004), e estável desde 1.0 Ga (Sato & Tassinari 1997). A Província Mineral de Carajás encontra-se na Província Amazônia Central (>2.2Ga), a mais antiga do craton, sem registros de deformação/magmatismo da Orogenia Transamazônica (Tassinari & Macambira 2004).

A Província Mineral de Carajás, estabilizada tectonicamente no Arqueano (Machado *et al.* 1991, Galarza & Macambira 2002, Leite *et al.* 2004), é limitada pelo Cinturão Araguaia (leste) e pela província Maroni-Itacaiunas (norte); nas porções sul e oeste, encontra-se parcialmente coberta por unidades sedimentares da Bacia Parecis, e vulcânicas do Grupo Iriri (Costa *et al.* 1995, Souza 1996, Leite *et al.* 2004). Esta província encontra-se subdivida em dois domínios tectônicos: o Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria; e o Bloco Carajás, que é subdividido em Bacia Carajás e Domínio de Transição (Dall'Agnol *et al.* 1997) (Figura 1). O Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (Macambira & Lafon 1995, Dall'Agnol *et al.* 2006) é formado por rochas arqueanas e proterozóicas, que compreendem greenstone belt, granitoides arqueanos, granitos anorogênicos proterozóicos e diques associados. O Supergrupo Andorinhas é formado pelos grupos Sapucaia, Identidade, Lagoa Seca, Babaçu, Seringa e Pedra Preta. Sua unidade porção inferior engloba basaltos, talco-xistos, metaturfos, metacherts e formações ferríferas bandadas. A unidade superior é constituída de metapelitos, metapsamitos e metariodacitos. Os greenstone belts foram individualizados em seis grupos: Gradaús, Serra do Inajá, Lagoa Seca, Babaçu, Sapucaia e Tucumã (Vasquez *et al.* 2008).



Províncias Geocronológicas

- Sunsás (1,25-1,0 Ga)
- Rondoniana-San Ignácio (1,55-1,3 Ga)
- Rio Negro-Juruena (1,8-1,55 Ga)
- Ventuari-Tapajós (1,9-1,8 Ga)
- Maroni-Itacaiúnas (2,2-1,9 Ga)
- Amazônia Central (>2,5 Ga)

Unidades Geológicas

- Coberturas Fanerozóicas
- Granitóides
- Cobertura Pré-Cambriana
- Vulcanismo Ácido intermediário
- Vulcanismo Máfico
- Greenstone belts
- Complexos Granulíticos
- Cinturões Móveis Neoproterozóicos
- Cinturões Móveis Neoproterozóicos

Figura 2.1 – Províncias Geocronológicas do Craton Amazônico
Fonte: (Tassinari & Macambira 2004)

A Província Carajás (Figura 2.2) é dividida em dois domínios tectônicos distintos (Souza *et al.* 2001, Santos 2003, Dall’Agnol *et al.* 2006, Vasquez *et al.* 2008): o Domínio Rio Maria, localizado a sul e com idade mesoarqueana, corresponde ao Terreno Granito-Greenstone Rio Maria (Santos *et al.* 2000, Tassinari & Macambira

2004, Dall'Agnol *et al.* 2005, Vasquez *et al.* 2008, Feio 2011) e o Domínio Carajás, localizado a norte, com idades neoarqueanas. Entre estes dois domínios citados acima, existem os chamados Sub-Domínio Canaã dos Carajás (DCC) e Sub-Domínio Sapucaia (DS), que representam as porções norte e sul, respectivamente, do anteriormente chamado Subdomínio de Transição (Feio *et al.* 2013).

2.1.1 Domínio Carajás

O Domínio Carajás constitui a porção norte da Província Mineral de Carajás e inclui rochas Vulcano-sedimentares, granitoides, os complexos Xingu e Pium. Este bloco engloba os subdomínios Canaã dos Carajás e Sapucaia.

2.1.1.1 Bacia Carajás

A Bacia de Carajás tem sua expressão regional controlada por feixes de estruturas EW que formam leques imbricados de cavalgamentos oblíquos dúcteis, em domínios dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento (Araújo & Maia 1991). Seu embasamento inclui rochas arqueanas como: corpos estratiformes básico-ultrabásico representado por granulitos máficos a félsicos e gnaisses tonalíticos e granodioríticos, migmatizados e anfibolitos dos complexos Pium e Xingu (Araújo & Maia 1991, Rodrigues *et al.* 1992).

Ainda não existe um modelo evolutivo e paleogeográfico bem definido para a Bacia de Carajás. Entretanto, (Pinheiro & Holdsworth 1997a) defende uma evolução com base em movimento transpressivo sinistral, que teria desenvolvido uma trama milonítica na direção E-W, e afetou o embasamento (Complexo Pium, Complexo Xingú e Suíte Plaquê). Subsequentemente, ocorreriam movimentos transpressivos sinistrais, desenvolvendo zonas de cisalhamento, dobras e metamorfismo no embasamento. E posteriormente, movimentos extensionais, propiciado a formação da Bacia Carajás, na qual foram depositadas as sequências vulcano-sedimentares e os sedimentos da Formação Águas Claras. Novos movimentos transpressivos destrais desenvolveram um conjunto de falhas transcorrente E-W e NW-SE, e normais, que formam os Sistemas Transcorrente Carajás e Cinzento (Pinheiro & Holdsworth 2000a) e onde está inserida a Falha Carajás. Em outro episódio, sob regime de transpressão sinistral, houve a inversão e deformação das sequências vulcano-sedimentares desta bacia. Finalmente, ocorreram intrusões de diques e plútons graníticos proterozóicos, sob movimentos extensionais (transtensivos), dando a estruturação tectônica atual da Bacia Carajás.

As unidades estratigráficas da Bacia de Carajás incluem as rochas supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas, Formação Águas Claras e Formação Gorotire.

O Supergrupo Itacaiúnas é formado por rochas metavulcano-sedimentares dos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará, Igarapé Bahia e Buritirama (Docegeo 1988). O Grupo Igarapé Salobo é composto de paragneisses da Formação Gnaiss Cascata, com intercalações de anfibolitos e metapelitos na base, xistos ferruginosos mineralizados em cobre na porção intermediária (Formação Três Alfa), e quartzitos, gnaisses andesíticos, metarcóseos e xistos da Formação Cinzento, no topo. Estudos recentes restringem esse grupo às rochas vulcano-sedimentares da Serra do Salobo (Vasquez *et al.* 2008). O Grupo Igarapé Pojuca é composto de anfibolitos metarenitos, metasiltitos, formações ferríferas, metacherts, que são cortados por diques de metagabros e metadiabásios. O Grupo Grão-Pará (Hirata *et al.* 1982). é representado pelos metabasaltos e riolitos da Formação Parauapebas, e jaspelitos da Formação Carajás. O Grupo Igarapé Bahia corresponde às rochas vulcano sedimentares de baixo grau metamórfico das Formações Grotta do Vizinho e Sumidouro. O Grupo Buritirama inclui quartzitos micáceos e mica-xistos. Em testemunhos de sondagem ocorrem mica-xistos carbonatados, rochas calciossilicatadas, leitos de mármore e horizontes do protominério de Mn (Docegeo 1988).

A Formação Águas Claras, representa uma unidade sedimentar siliciclástica arqueana discordante ao Supergrupo Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988), composta de arenitos, pelitos e siltitos de ambientes litorâneos a fluviais (Nogueira *et al.* 1995) que afloram especialmente na porção central do Sistema Transcorrente de Carajás (Pinheiro & Holdsworth 1997a). Atualmente é subdividida em dois membros: 1) Inferior: pelitos, siltitos e arenitos; 2) Superior: arenitos.

A Formação Gorotire é constituída de arcóseos grossos a conglomeráticos com seixos de quartzo, K-feldspato, formação ferrífera, e rochas básicas. Também ocorrem para conglomerados polimíticos marrom avermelhados, litificados, com seixos e matações (vulcânicas, graníticas, gnaisses, xistos, anfibolitos, pegmatitos, fragmentos de minério de Mn). É considerada uma sequência clástica imatura não deformada (Pinheiro & Holdsworth 1997a, Lima 2002) que ocorre exclusivamente na terminação leste da Falha Carajás.

As rochas sedimentares da Bacia de Carajás são intrudidas por granitos arqueanos dos complexos Luanga, Estrela, Serra do Rabo e Old Salobo, e granitos anorogênicos proterozóicos da Suíte Carajás. Outras intrusões neoarqueanas incluem o Complexo máficoultramáfico Luanga, diques e sills máficos, e granitos como o Estrela e Old Salobo. Granitos anorogênicos de composição sieno a monzogranítica (Dall’Agnol *et al.* 1994) cortam as unidades mais antigas e compõem a suite Granítica Carajás. O Complexo Intrusivo Luanga é representado por rochas básicas e ultrabásicas acamadadas (Rosière *et al.* 2006). O Complexo Granítico Estrela, formado predominantemente por monzogranitos, com ampla variação faciológica (Barros *et al.*, 2004). O Granito Serra do Rabo é composto predominantemente por granitos e sienogranitos, e compõem dois stocks sintectônicos, na terminação leste da Falha Carajás. O Granito Old Salobo é sódico, metaluminoso (Lindenmayer 1990, Lindenmayer & Fyfe 1992) A Suíte Granítica Carajás é composta pelos granitos Serra dos Carajás, Cigano e Pojuca (Docegeo 1988, Rios *et al.* 1995).

2.1.1.2 Sub Domínio Canaã dos Carajás

O sub domínio Canaã dos Carajás (DCC), localizado ao norte do Domínio Sapucaia, é interpretado como o embasamento da Bacia Carajás. É representado pelas rochas de alto grau do Ortogranulito Chicrim-Cateté, ortognaisses e granitoides do Complexo Xingu, granitoides mesoarqueanos como Tonalito Bacaba, Trondhjemitó Rio Verde, granitos Bom Jesus, Cruzadão, Boa Sorte e Serra Dourada, rochas do Complexo Tonalítico Campina Verde, rochas gabroicas da série charnockítica do Diopsídio-Norito Pium, granitoides neoarqueanos das suítes Plaqué, Planalto e Pedra Branca (Dall’Agnol *et al.* 2013).

2.1.1.3 Sub Domínio Sapucaia

O sub domínio Sapucaia (DS), localizado na parte central da Província Carajás, é composto por greenstone belts do Grupo Sapucaia, rochas TTG do Tonalito Caracol, rochas afins do Tonalito Mariazinha (Almeida *et al.* 2011), Trondhjemitó Colorado e afins (Almeida *et al.* 2011, Santos *et al.* 2013, Santos & Oliveira 2014, Silva *et al.* 2014), Trondhjemitó Água Fria (Leite *et al.* 2004), granodioritos sanukitoides tipo Água Azul (Gabriel *et al.* 2010) e Água Limpa (Sousa *et al.* 2010), granitoides alto Ba-Sr como o Leucogranodiorito Pantanal (Teixeira *et al.* 2013), e granitos potássicos como o Granito Xinguara (Leite *et al.* 2004). As rochas do DS são similares às pertencentes ao

DRM, porém afetadas por eventos neoarqueanos relacionados à instalação do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Dall’Agnol *et al.* 2013).

2.1.2 Domínio Rio Maria

O Domínio Rio Maria (Vasquez *et al.* 2008), denominado anteriormente de Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (TGGRM), é o domínio com evolução geológica melhor estudada no contexto da Província Carajás. É formado por greenstone belts (Supergrupo Andorinhas) e granitoides (Pimentel & Machado 1994, Macambira & Lafon 1995, Althoff *et al.* 2000, Leite 2001, Leite *et al.* 2004, Dall’Agnol *et al.* 2006), todos com idades arqueanas, cortados por granitos anorogênicos proterozoicos e diques associados. Sua divisão é feita com base em características petrográficas, geoquímicas e geocronológicas (Carvalho 2017).

A área estudada está posicionada no Domínio Carajás que se apresenta em mapa como um sigmóide quilométrico, com assimetria em “Z” resultante de conjuntos de cisalhamentos NE-SW, com espaçamento de dezenas de quilômetros, que se movem com cinemática sinistral. Essa estrutura se apresenta com geometria de um sinclinório aproximadamente E-W, assentado sobre rochas do embasamento granito-greenstone. Tem nas bordas rochas arqueanas do Grupo Grão Pará (rochas vulcânicas e formações ferríferas intercaladas), sobrepostas por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do Grupo Igarapé Bahia, que por sua vez estão parcialmente encobertas por rochas clásticas proterozóicas do Grupo Águas Claras. Estas rochas estão cortadas pelo Granito Central de Carajás de idade 2.0Ga (Barros *et al.* 1995, Rios *et al.* 1995).

Destaca-se, portanto, que as rochas ferríferas estão dispostas nas bordas N (Serra Norte) e S (Serra Sul) do sinclinório de Carajás (Figura 2.2). Na Serra Norte estas rochas estão sobradas em um par antiforme / sinforme decorrente de arrasto de E para W ao longo a Falha Carajás (Pinheiro & Holdsworth 1997b). A área estudada corresponde a borda sul da estrutural sinclinal de Carajás, na chamada Serra Sul.

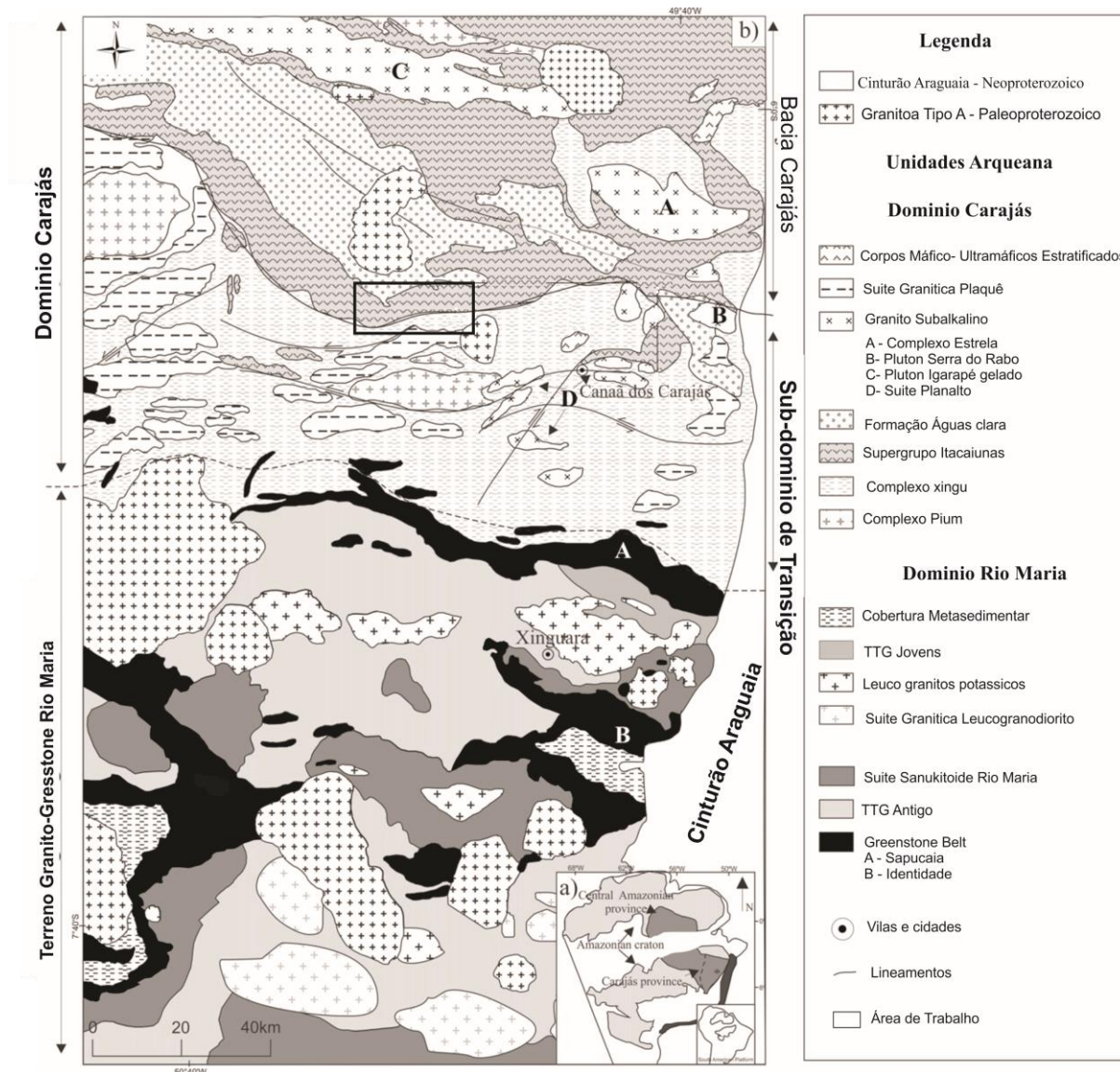


Figura 2.2 – Mapa geológico simplificado da província Carajás (Leite et al. 2004, Dall’Agnol et al. 2006, Vasquez et al. 2008, Almeida et al. 2011, Feio et al. 2013). A área de pesquisa está inserida na Bacia de Carajás dentro do contexto do Supergrupo Itacaiunas, especificamente no Grupo Grão Pará

2.2 GEOLOGIA LOCAL

A área de pesquisa, o platô S11D, localizasse-se na parte sul da Serra dos Carajás, complexos de Serras S11, com predominância para as rochas pertencem do Grupo Grão Pará (Figura 2.2). Este grupo tem três unidades principais: (1) basaltos da Formação de Parauapebas (Meirelles *et al.* 1984). (2) rochas máficas com intercalações de tufos, seguidos por rochas sedimentares clásticas e químicas da Formação Igarapé Cigarra (Macambira 2003a) e (3) as rochas ferríferas da Formação de Carajás (Beisiegel *et al.* 1973, Beisiegel 1982, Macambira 2003a).

As rochas vulcânicas são uma sequência bimodal de basaltos, doleritos e riólíticos com idade de 2758 ± 39 Ma U-Pb em zircão, interpretada como idade mínima da erupção (Gibbs *et al.* 1986). De acordo com as evidências geoquímicas, o vulcanismo parece ter composição toleítica de ambiente continental (Gibbs *et al.* 1986, Gibbs & Wirth 1990, Lindenmayer & Fyfe 1992). Na região do S11D, as unidades da Formação Parauapebas e Igarapé Cigarra estão tectonicamente justapostas a Formação Carajás (Resende & Barbosa 1972, Beisiegel *et al.* 1973, Macambira 2003a, Cabral *et al.* 2016).

As rochas ferríferas da formação de Carajás são compostas por vários tipos diferentes de minério de ferro, todos pertencentes à fácies de óxido (Tolbert 1971, Resende & Barbosa 1972, Beisiegel 1982, Pinheiro & Holdsworth 1997b, Macambira 2003a).

A nomenclatura utilizada na literatura existente sobre a mina refere-se principalmente ao uso industrial ou propriedades físicas do minério. Os principais tipos de materiais ricos em ferro na jazida são: Hematita Friável (HF): formadas predominantemente pelo enriquecimento supergênico dos jaspelitos. Hematita Compacta (HC): sua ocorrência é restrita a algumas regiões do Bloco D preferencialmente abaixo da camada superior de canga estruturada (CE). Ocorrem na forma de lentes e/ou bandas intercaladas aos jaspelitos de forma concordante. Hematita Manganésifera (HMN): este litotipo ocorre em pequenas lentes dispersas ao longo do depósito no Bloco D. Às vezes estas lentes são contínuas de uma seção geológica para outra. Ocorre na maioria das vezes associada aos contatos com jaspelitos e rochas máficas, podendo também se apresentar sob forma de lentes isoladas no meio das hematitas friáveis. Jaspelito (JP): são formações ferríferas bandadas geralmente da fácies óxido, compostas pela alternância entre bandas e lâminas de jaspe/sílica e bandas de hematita. Subordinadamente ocorrem também bandas de clorita e carbonatos alternados com as bandas de hematita (Vale 2008).

As cangas representam um produto da meteorização sobre as sequências características da região. Ocorrem de diversas formas dependendo do substrato rochoso sobre o qual se desenvolveram e das condições fisiográficas locais. Possuem ampla expressão na porção superior do Corpo S11, constituindo elemento de sustentação do topo do platô. Foram divididas em tipos distintos cobrindo as formações ferríferas: a) Canga Química (CQ): rocha de natureza detrítica gerada pela erosão da camada de

formação ferrífera. Recobre grande extensão da área de Serra Sul juntamente com as cangas estruturais). b) Canga de Minério (CM): minério formado por blocos de minério (hematita dura e semidura) cimentados por óxidos hidratados de ferro, precipitados quimicamente e com pouco material argiloso. c) Canga Estrutural (CE): rocha predominantemente compacta em avançado estado de alteração intempérica, onde não é possível distinguir a mineralogia a olho nu (Resende & Barbosa 1972).

Figura 2.3 – Mapa geológico-estrutural simplificado da área do S11D na Serra Sul elaborado durante a pesquisa com os dados estruturais e a seção geológica sobre a Formação Carajás. Fonte: Mapa estrutural da área da mina do S11D confeccionado pelo autor, mapa geológico modificado de (Vale 2008)

CAPITULO 3 - SISTEMA DE LEVANTAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO *LIGHT DETECTION AND RANGING* (LiDAR)

Levantamentos topográficos planialtimétricos de elevação da superfície da Terra são empregados em diversas aplicações desde operacionais até científicas. A base cartográfica auxilia no conhecimento geológico e geomorfológico de uma dada região. A topografia, cujo significado etimológico e descrição do lugar, existe há vários séculos desde os antigos egípcios e gregos -, porém novas tecnologias continuaram a ser desenvolvidas para melhorar a qualidade dos dados topográficos. Inicialmente os mapas de curvas de nível eram constituídos apenas de levantamento em campo (Carneiro 2011).

No último século, a fotografia aérea, e posteriormente os sistemas óticos digitais, passaram a ser usados no mapeamento do relevo terrestre. Recentemente, surgiu o mapeamento a laser aerotransportado, também conhecido como *Light Detection and Ranging* (LiDAR), como uma nova tecnologia de alta precisão, notadamente quando o estudo necessita de modelos digitais de elevação com alta densidade de pontos e conseqüentemente alta resolução (Wehr & Lohr 1999, Giglierano 2007, Carneiro 2011).

O mapeamento a laser aerotransportado tem diversas denominações, tais como LiDAR, Mapeamento do Terreno por Laser aerotransportado, Mapeamento por laser aerotransportado, Varredura ou Perfilamento a Laser, Laser *Scanner* Aerotransportado, Sistema Laser *Scanner*, Laser *Scanning* entre outras, aqui utilizaremos a denominação Mapeamento a Laser Aerotransportado (LiDAR) (Wehr & Lohr 1999, Giglierano 2007).

O uso do laser como instrumento de sensoriamento remoto vem sendo aplicado há mais de trinta anos. No período de 1960 a 1970, diversas pesquisas demonstraram o poder do uso do laser em monitoramentos atmosféricos e estudos oceanográficos (Abshire *et al.* 2005, Weitkamp 2006).

A partir de 1980, o mapeamento a laser passou a ser utilizado também por aeronaves, a exemplo das missões da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para mapeamento topográfico do gelo ártico - o *Airborne Topographic Mapper* (ATM) e para mapeamento oceanográfico - o *Airborne Oceanographic LiDAR* (AOL) (Krabill *et al.* 1984, 1995). A NASA conduz ainda estudos topográficos em Marte utilizando o *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA), atualmente em órbita ao redor do

planeta. Entretanto, apenas nos últimos oito anos, o mapeamento a laser passou a ser usado comercialmente (Zuber *et al.* 1992).

O método baseia-se no tempo de emissão e recepção do pulso laser uni ou multidirecionais, com densidades de emissão de pulsos que podem superar os 100.000 pulsos por Segundo (Baltsavias 1999). O Sistema *Light Detection and Ranging* (LIDAR) aerotransportado - *Airborne Laser Scanner* (ALS) - tem tres componentes construtivos principais: *Inertial Navigation System* (INS), *Global Positioning System* (GPS) e o sistema de varredura a laser (Baltsavias 1999, Giglierano 2007).

O cálculo da posição do ponto e obtido por meio da integração de dados provenientes do GPS e dos adquiridos por sensores inerciais a bordo da aeronave. A medição das distancias entre o sensor e a superfície e obtida pelo sistema de varredura a laser, que registra e processa a diferenca de tempo entre o sinal (pulso laser) emitido pelo sensor e registrado pelo apos interagir com o alvo (Heidemann 2012).

O sistema aerotransportado de laser (ALS) para o mapeamento do terreno - *Airborne Laser Terrain Mapper* (ALTM) - captura coordenadas tridimensionais (X,Y e Z) de pontos sobre uma superfície, além de determinar uma quarta dimensão, para cada ponto, definida como intensidade e representada pela letra I (Baltsavias 1999, Starek 2016).

A Figura 3.1 ilustra como um laser *rangefinder* (telêmetro a laser) varre a superfície registrando os pulsos (distancias) e as respectivas direções (ângulos).

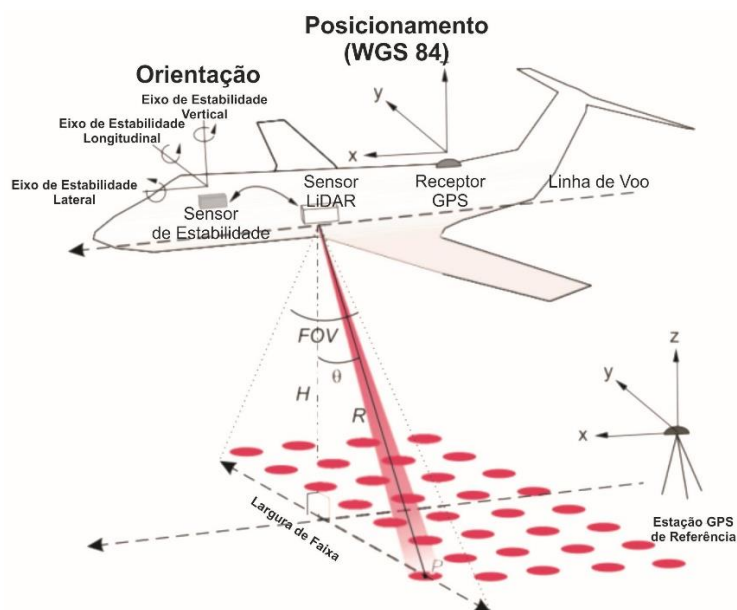


Figura 3.1 - Sistema LiDAR

Fonte: (Gallay 2013).

A fim de corrigir os movimentos da aeronave, no pós-processamento, geram-se e gravam-se pelo sistema de medição inercial as atitudes referentes a cada distancia medida (atitude e a posição do sensor no espaço, caracterizada pelos chamados ângulos de *Euler*) (Maas 2003).

O posicionamento da aeronave realiza-se por GPS mediante dois receptores, um instalado na aeronave e outro no terreno permitindo a correção diferencial e o refino das coordenadas. Durante a realização do voo, os dados gerados combinam-se e determinam a posição precisa dos pontos de terreno. A precisão nominal do sistema e de cerca de 10 a 20 cm *emq* (*emq* - erro médio quadrático) para altimetria e o fator $h/2000$ (onde h e a altura de voo em metros) para planimetria, ou seja, para altura de voo de 1.000 m, o *emq* para planimétrica esperado e de 50 cm (Maas 2003).

O *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) e um raio de luz que percorre uma direção e, ao se chocar com uma partícula, dispersa-se em todas as direções; parte retorna a direção de origem sendo capturado pelo sensor. A intensidade do sinal pode determinar o tempo de voo do momento de transmissão do pulso até a recepção do eco originado pela interação do laser com a substancia ou o objeto de contato (Rivas *et al.* 2003, Carneiro 2011).

O processo tem como princípio básico o tempo de emissão, e o retorno de um pulso de laser se denomina *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e permite capturar diversos tipos de informação sobre a superfície. Por exemplo, por meio do valor de I , intensidade, pode-se diferenciar um veículo de um telhado localizado embaixo de uma arvore (Rivas *et al.* 2003, Carneiro 2011).

O sistema LiDAR permite a separação dos pulsos emitidos de maneira a posicionar os objetos em seu topo e ao nível do terreno, respectivos e genericamente denominados primeiro retorno (*first pulse*) e último retorno (*last pulse*). Cada pulso emitido pode resultar em diversos retornos como se observa na Figura 3.2 (Harding 2000). Cada retorno resulta uma medida de distância entre o sensor e o objeto. Esses sistemas normalmente são programados para gravar o primeiro e o ultimo retorno, os quais possibilitam a construção do modelo digital de elevações (MDE) para o primeiro pulso e do modelo digital do terreno (MDT) para o ultimo pulso (Harding 2000, Giongo *et al.* 2010).

As vantagens no emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado são resultado de uma análise comparativa entre as técnicas que são capazes de gerar documentos cartográficos similares. A maior vantagem da técnica de mapeamento a laser aerotransportado está na rapidez como os dados são coletados e processados. Com uma massa de dados representativa da superfície de interesse processada, obtém-se o Modelo Digital do Terreno.

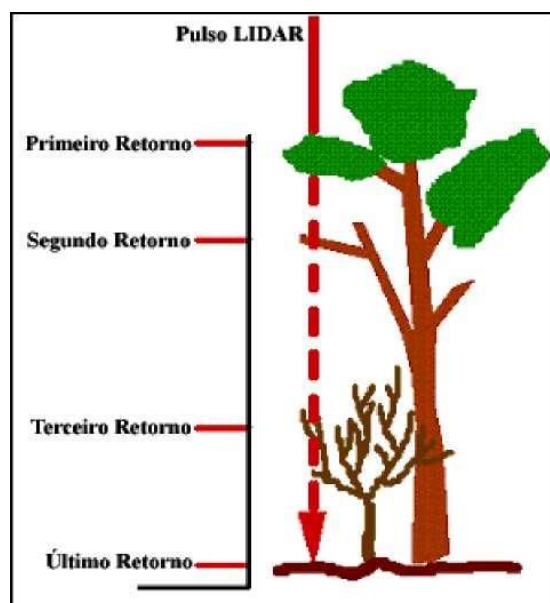


Figura 3.2 - Pulsos de retornos LiDAR
Fonte: (Harding 2000).

A técnica de mapeamento a laser aerotransportado possibilita levantar sobre a superfície do terreno uma nuvem de pontos semi aleatoriamente distribuídos (Petzold *et al.* 1999) e gerar, a partir dessa nuvem, uma grade regular de pontos 3D georreferenciados - expressa sob a forma de um *Digital Surface Model (DSM)*, *Digital Elevation Model (DEM)* ou *Digital Terrain Model (DTM)*.

O mapeamento a laser aerotransportado - LiDAR - é uma técnica monoscópica, de modo que um único pulso LASER atingindo o solo já é suficiente para que se obtenha a altitude naquele ponto, enquanto pela Fotogrametria, torna-se necessário que o mesmo ponto seja claramente visível em duas fotografias, pelo menos, para se determinar a altitude do terreno, o que é probabilisticamente muito difícil em terrenos recobertos de árvores (Giongo *et al.* 2010, Carneiro 2011). O mapeamento a laser opera com excelentes e diferentes resultados em superfícies homogêneas como desertos, áreas de dunas e geleiras, o que usualmente traz dificuldades durante as medições fotogramétricas pela falta de pontos identificáveis (Baltsavias 1999, Wehr & Lohr 1999).

A grande maioria do mapeamento topográfico no mundo (99%), executa-se com câmeras aerofotogramétricas convencionais (analógicas). Os produtos advindos do emprego dessa técnica ainda são considerados padrão no julgamento dos produtos gerados com o emprego de outras técnicas, como o mapeamento a laser aerotransportado (Petrie 2000, Zhiqing *et al.* 2006).

3.1 FONTES DE ERRO

Os erros nas coordenadas tridimensionais LiDAR normalmente tem origem no sistema de orientação do sistema (GPS, INS ou GPS e INS combinados, ou ainda na integração desses componentes) (Crombaghs *et al.* 2000). Essas fontes de erro podem ser agrupadas em quatro categorias: por ponto, por erro nas observações GPS, por faixa (produzida pela varredura contínua do sensor aerotransportado), por bloco (oriunda da junção das faixas). As diversas fontes e tipos de erro que ocorrem no sistema LiDAR, mostradas por (Behan *et al.* 2000), ilustram-se a Tabela 1.

Tabela 3.1: Fonte de erros nas coordenadas tridimensionais LiDAR

GPS	INS	LASER	INTEGRAÇÃO
Refração Ionosférica	Derivas no giroscópio	Espaçamento entre os pontos no terreno	Sincronismo dos sistemas
Fixação das Ambiguidades	Alinhamento em relação ao campo gravitacional terrestre	Tipo do terreno (cobertura e inclinação)	Transformação entre os sistemas
Interpolação		Calibração	Transformação de coordenadas

Fonte:(Behan *et al.* 2000, Maas 2003, Carneiro 2011).

Algumas das principais fontes de erro que afetam os dados LiDAR são (Maas 2003):

- a) a grande maioria dos sistemas LiDAR comercializada atualmente tem cada distancia respectiva a cada pulso emitido e recebido, e depende da qualidade dos sistemas de medição de tempo ou dos sistemas medidores da fase da onda portadora;
- b) o tipo e inclinação da superfície que reflete o pulso laser;
- c) erros oriundos do funcionamento dos sistemas mecânicos que controlam o espelho (controlador do feixe de varredura), vibrações e oscilações dos sistemas componentes LiDAR, ou de toda a aeronave;
- d) as posições da aeronave e do sistema de varredura são determinadas por técnicas de posicionamento GPS, portanto dependente da constelação GPS (o erro

altimétrico e normalmente maior que o planimétrico no posicionamento por GPS);

e) os sistemas INS e GPS se integram visando a interpolação e suavização dos parâmetros definidores da trajetória tridimensional a que está sujeita a origem do sistema LiDAR (atitude do sistema); erros aleatórios ou derivas não compensadas no INS conduzem a erros na orientação da plataforma, por conseguinte, conduzem a erros em planimétrica;

f) erros sistemáticos, por imperfeições de montagem (off-sets) dos diversos integrantes do sistema LiDAR entre si, bem como falhas de sincronização entre estes, conduzem a erros sistemáticos no posicionamento por LiDAR;

g) erros causados pelas transformações de coordenadas, desde os sistemas internos até os de interesse do usuário - por exemplo, ao sistema SAD69 para planimetria e altitude ortométrica ou ao SIRGAS2000 e altitude ortométrica, ambos os sistemas oficiais e integrantes do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB);

h) propagação do erro na determinação das coordenadas da origem do sistema LIDAR, em razão da dependência linear entre a geração de coordenadas planimétricas por LIDAR e a altura de voo da aeronave; essa dependência linear é menos relevante para altimetria (a distância inclinada varia entre 2 a 3 cm).

3.2 APLICAÇÃO

No Brasil, são incipientes os estudos desta tecnologia aplicada a Geociências, porém na Europa, Canadá e nos Estados Unidos, encontram-se diversos estudos, entre outros, a investigação de (Grebby *et al.* 2011) do *Department of Geology, University of Leicester*, intitulada “Aplicação de dados LiDAR obtidos por aerolevantamentos e imagens multiespectral para o mapeamento estrutural em uma seção do ofiolito Troodos, Cyprus”. Segundo (Fowler 2001), a utilização dos dados de mapeamento a laser aerotransportado é apenas limitada pelas necessidades, suporte de TI e disponibilidade de softwares aos usuários.

Relacionam-se a seguir as aplicações atualmente pesquisadas para os produtos provenientes do emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado, LIDAR.

3.2.1 Meio ambiente

Na avaliação e análise ambiental, podem-se relacionar estudos relativos a alteração climática, elevação do nível do e derretimento de geleiras; danos provocados por inundações, terremotos, maremotos, furacões, entre outros, relativamente a sua

magnitude e extensão; riscos, principalmente os referentes a inundações e incêndios. Modelos digitais de superfície e de elevação são utilizados, pelos planejadores governamentais, tanto do ponto de vista local (urbano ou rural) como do ponto de vista regional, no estudo de tais riscos e no desenvolvimento de planos de prevenção. Outros riscos normalmente analisados por meio da técnica de mapeamento a laser aerotransportado são os de erosão e de deslizamento de encostas (Carneiro 2011).

3.2.2 Mapeamento topográfico

Dentre as aplicações relacionadas com o mapeamento topográfico, destacam-se o mapeamento de corredores ou feiões lineares como estradas (rodovias e ferrovias), linhas de transmissão de energia e dutos (gás e óleo); a técnica tem sido empregada também no estudo do potencial hidrelétrico de bacias hidrográficas, levantando feiões hidrográficos lineares como vales de rios.

Em zonas costeiras, principalmente em estudos das praias e dunas, na análise da topografia, dos perfis, da estrutura e dos processos de transporte de sedimentos, proporcionando vantagens em relação ao emprego da técnica fotogramétrica tradicional, dificultado pelo relevo quase plano e pela homogeneidade (pouco contraste) característica daquelas feiões (Gigliano 2007).

Em áreas de floresta densa, o emprego da técnica de mapeamento a laser aerotransportado se destaca no sentido do gerenciamento dos recursos naturais e para a indústria florestal. Essa técnica permite obter informações acuradas sobre a altura da vegetação e sua densidade (distribuição espacial). Os sistemas capazes de captar mais de dois retornos por pulso, ou, até mesmo, de captar o feixe laser emitido na forma de uma onda contínua, são especialmente úteis na determinação de algumas das principais características estruturais da vegetação como altura, diâmetro, espécie, estimativa de biomassa, volume e condição das árvores (Andersen *et al.* 2004), fornecendo dados para diversos estudos, por exemplo, o preparo de inventários florestais e simulação da remoção virtual de cobertura vegetal (Fowler 2001).

Áreas urbanas, onde se utilizam modelos digitais de superfície na geração de ortofotocartas e em outros estudos como os realizados pela indústria das comunicações, relativamente a definição de áreas de sombras nas simulações de propagação de ondas eletromagnéticas, ou ainda, nas simulações do impacto de ruídos em edificações que cercam uma rota de tráfego planejada. Assim como em simulação de demolição de grandes obras de engenharia permitindo a análise de alteração da paisagem;

Telecomunicações na obtenção de modelos de elevação que permitam estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras.

3.2.3 Geologia

As aplicações de topografia de certo modo são úteis em geologia para levantamentos de picadas, avaliação do terreno com relação a declividade e aplicações geomorfológicas. No entanto diversas outras aplicações vêm sendo desenvolvidas. O uso de classificadores de rugosidade do terreno para determinar tipo de substrato tem sido estudado por diversos autores (Cunningham *et al.* 2006a, Grebby *et al.* 2011). Em análises geotécnicas na prevenção e no monitoramento de deslizamento de encostas (Cunningham *et al.* 2006b, Lato *et al.* 2009, Hu *et al.* 2010, Jaboyedoff *et al.* 2012). E em investigação da geologia estrutural (Fowler *et al.* 2011, Barth *et al.* 2012, Grebby *et al.* 2012, Barth 2014, Dyess & Hansen 2014).

CAPITULO 4 - USO DE DADOS LiDAR AEROTRANSPORTADOS PARA MAPEAMENTO ESTRUTURAL DA ÁREA DA MINA DE FERRO DO S11D, SERRA DOS CARAJÁS, AMAZÔNIA

4.1 INTRODUÇÃO

Em regiões tectonicamente deformadas, o levantamento dos dados de geologia estrutural torna-se um dos principais objetivos da cartografia geológica (Barnes & Lisle 2013). As reconstruções estruturais sistemáticas baseadas na abordagem geométrica da geologia da superfície e nas regras estruturais simples foram usadas pela primeira vez no final do século XIX e no início do século XX para interpretar os padrões tectônicos regionais nas montanhas rochosas canadenses (Willis 1893, Chamberlin 1910, 1919). Mapas estruturais são constituídos por feições geométricas lineares e planares, tais como falhas e fraturas, dobras, e elementos da trama estrutural a partir de observações e coleta de dados em campo (Grebby *et al.* 2012). Análises sistemáticas de seções transversais tem permitido a avaliação e predição de estruturas a partir de regras geométricas em 2 -D e 3-D (Woodward 2012). A partir dessas análises, mapas estruturais tem sido utilizados em análises de recuperação de recursos minerais (Tunks *et al.* 2004), óleo e gás (Peña & Abdelsalam 2006), e hídricos (Moore & Waltz 1983, Kresic 1995, Karnieli *et al.* 1996, Wladis 1999, Peña & Abdelsalam 2006, Corgne *et al.* 2010).

Tradicionalmente, os mapas estruturais são os produzidos a partir da interpretação de dados coletados em campo. Isso traz limitações referentes ao tempo de coleta de dados e de acesso, principalmente em áreas vegetadas com poucos afloramentos (Suzen & Toprak 1998, Grebbi *et al.* 2011). Neste caso, a capacidade de se reconhecer e mapear feições estruturais utilizando dados de sensoriamento remoto tem demonstrado ser a melhor alternativa para fornecer informações complementares, contribuindo para a produção de mapas estruturais detalhados e abrangentes (Singhroy *et al.* 1993, Paradella *et al.* 1998)

Muitas feições estruturais importantes como por exemplo, bandamentos composicionais, dobras, acamamento, falhas, fraturas, veios e diques podem ser expressos como lineamentos em imagens de sensoriamento remoto e modelos digital de elevação MDE (Masoud & Koike 2006b).

Em representações da superfície terrestre em Modelos Digitais de Terreno (MDT), lineamentos geológicos são tipicamente associados a feições geomorfológicas,

como vales, cristas, escarpas e quebras de relevo (Jordan & Schott 2005). Até o século passado, lineamentos observados em produtos de sensoriamento remoto interpretados como estruturas geológicas eram geralmente extraídos manualmente. Nas últimas décadas, algoritmos automatizados têm sido bastante utilizado para extrair lineamentos geológicos em produtos de sensoriamento remoto (Argialas & Mavrantza 2004). Exemplos incluem algoritmos baseados em detecção de bordas Canny (Corgne *et al.* 2010), transformada de Hough (Karnieli *et al.* 1996, Fitton & Cox 1998), traçado de linha (Koike *et al.* 1995) e recursos de parametrização morfométricas (Wallace *et al.* 2006). Apesar do aumento da eficiência e objetividade do mapeamento dos lineamentos, existem restrições quanto à adequação de algoritmos automáticos de detecção de lineamento geológico (Parsons & Yearley 1986). No entanto a incapacidade de diferenciar traços geológicos de outros traços (por exemplo, estradas, limites de cercas), tem sido um dos maiores problemas no uso de algoritmos automáticos. Grebby *et al.* (2011) acreditam que o mapeamento estrutural regional é melhor realizado a partir da extração de lineamentos manualmente com base na percepção humana.

Modelos digitais de superfície (MDS) de resolução espacial moderada (~ 30 m), como os produzidos pela missão SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”), tem auxiliado os estruturalistas na identificação de feições estruturais regionais (Grohmann *et al.* 2007). Mais recentemente, com o advento dos sensores LiDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportados de alta resolução espacial (cerca de 4 a 50 pontos de elevação por 1 m²), os modelos digital de terreno são de grande relevância para a coleta, mapeamento e análise estrutural, isto porque esses conjuntos de dados permitam a extração informações detalhadas em escala local, livre da influência da cobertura vegetal, realçando as estruturas geológicas do terreno (Kraus & Pfeifer 1998, Wehr & Lohr 1999). Desta forma o LiDAR aerotransportado estabeleceu-se como uma importante ferramenta para o mapeamento de estruturas geológicas, em escala local e regional, em áreas vegetada (Cunningham *et al.* 2006b) ou não vegetada (Cawood *et al.* 2017).

O LiDAR tem provocado uma revolução na observação do relevo terrestre em virtude de revelar os detalhes topográficos da superfície terrestre em alta resolução espacial, permitindo a melhor compreensão das forças tectônicas e do arranjo estrutural das áreas observadas (Meigs 2013). Este estudo tem como o objetivo investigar a aplicação de dados LiDAR aerotransportados aplicados ao mapeamento estrutural em escala de detalhe em áreas de exposição de formações ferríferas bandadas

deformadas, intemperizadas sob clima tropical, vegetadas por savanas montanhosas, na região da Serra dos Carajás, sudoeste da Amazônia, mais especificamente na área da mina de ferro do S11D (Figura 1.1).

4.2 DADOS DE SENSORES REMOTOS

Os dados LiDAR são compostos de uma nuvem de pontos com as informações X, Y e Z, gerados a partir da interação do sinal com os alvos, que vão desde o dossel das árvores até a superfície do terreno. Os dados foram adquiridos pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos Ltda no período de março a dezembro de 2009. O equipamento utilizado foi o ALTM 2025 da Optech Inc, que emite 25.000 pulsos LASER por segundo, em um ângulo de varredura de até 40° a uma altitude de até 2.000 metros. Neste projeto utilizou-se um ângulo de varredura de 20°, onde a altura média de voo foi de 1000 metros. Estes parâmetros resultaram em uma densidade de 4 pontos por m² no terreno. Os dados foram referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro South American Datum 1969 - SAD69, originando modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais do terreno (MDT) em uma área de 129.000 ha, divididos em 274 arquivos disponibilizados no formato .LAS, formando uma nuvem de mais de cem milhões de pontos.

4.3 MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho consistiu em quatro etapas: análise das estruturas geológicas medidas em campo, realce de alinhamentos estruturais dos dados LIDAR, extração manual dos alinhamentos nas imagens LiDAR, e avaliação comparativas dos dados coletados em campo e nas imagens LiDAR. Cada uma destas etapas são detalhadas nos itens abaixo.

4.3.1 Mapeamento das estruturas de campo

Para a execução deste trabalho foi realizado a análise das estruturas geológicas presente nas rochas ferríferas no corpo S11D. Neste sentido foram utilizados os mapas geológico-estrutural das áreas alvos e a partir de trabalhos de campo selecionou-se afloramentos para realização de medições estruturais no formato mergulho/sentido do mergulho nas áreas chaves. Estes locais foram escolhidos levando-se em conta do tipo de rocha e das estruturas presentes, além da disponibilidade de acesso e as boas exposições de afloramentos rochosos.

Nas rochas ferríferas da área de estudo foram mapeadas as seguintes estruturas planares, bandamentos, dobras, falhas e fraturas. Os exemplos típicos dessas estruturas foram descritas utilizando o método de painéis de afloramento, os painéis foram desenhados em quadriculas com aproximadamente 10 x 10 (m), com espaçamento interno de 1 x 1 m, sendo possível a observação do comportamento espacial dos elementos da trama estrutural a partir dos desenhos das feições estruturais nas rochas. (Barnes & Lisle 2013, Bennison *et al.* 2013). Nos locais dos painéis foram extraídos perfis topográficos no MDT, visando observar a possível relação das estruturas observadas em campo e a resposta do LIDAR para determinar a utilidade dos conjuntos de dados para mapear as estruturas previamente identificadas. A localização dos painéis foi obtida utilizando o GPS Geodésico modelo Trimble R4.

4.3.2 Realce de alinhamentos estruturais dos dados LIDAR

Os resultados da análise das estruturas geológicas nas rochas a partir de dados LiDAR mostraram-se promissores. Feições estruturais foram evidenciadas, tais como, bandamentos, acamamentos, falhas e fraturas. Conseqüentemente, foram utilizadas duas técnicas de realce digital, que foram aplicadas aos dados LiDAR para auxiliar na geração de mapas de lineamentos estruturais.

4.3.2.1 Modelo de relevo sombreado do MDT-LiDAR

Modelos de relevo sombreado são imagens topográficas que simulam a reflexão da luz artificial sobre uma superfície a partir da iluminação em uma direção específica (Horn 1981, Raper 1989).

Estes modelos foram gerados a partir dos MDTs, com atribuição de tons de cinza aos pixels para representar sua reflectância, que é calculado a partir do ângulo em que a luz incide sobre o terreno, utilizando um Modelo de Reflexão Lambertiano (Masoud & Koike 2006a, Grebby *et al.* 2011). A possibilidade de alterar os efeitos de sombreado variando a inclinação da iluminação e o ângulo de azimute torna o modelo de relevo sombreado uma poderosa ferramenta para a identificação de lineamentos em uma gama de orientações.

Foram realizados vários testes com geometria de visadas e ângulo de elevação de iluminação do MDT, desde visadas isoladas a visadas multidirecionais. Os melhores resultados apresentado foram com as visadas multidirecionais com configuração de três visadas agrupadas. Estas visadas apresentaram as seguintes configurações: visada

centrada em 0 az (N, N45W e N45E), 90 az (E, N45E e N45W), 180 az (S45E, S e S45W), e 270 az (W, N45W e S45W), todas com exagero vertical de 2,5. Por fim, as imagens foram visualmente interpretadas para produzir um único mapa de lineamentos. A Figura 4.1 ilustra os quatro modelos de relevo sombreado multidirecional, nas configurações descritas acima.

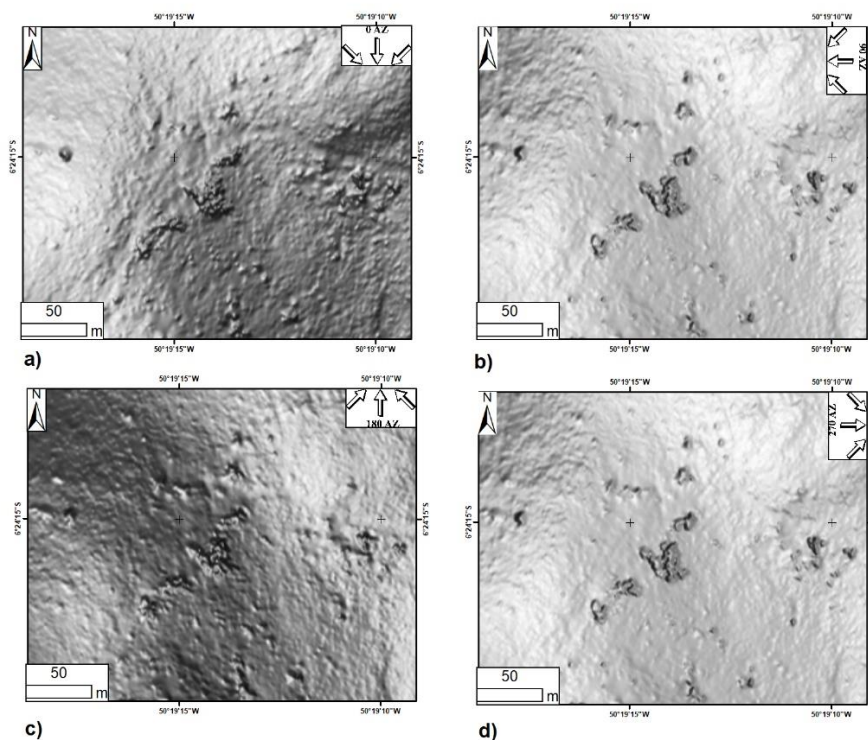


Figura 4.1 - Mdt com visadas multidirecionais agrupadas em três visadas distintas: visada centrada em: a) 0 az (N, N45W e N45E), b) 90 az (E, N45E e N45W), c) 180 az (S45E, S e S45W), e d) 270 az (W, N45W e S45W), com exagero vertical de 2,5

Para realçar o contraste entre as variações de níveis de cinza, nas imagens de relevo sombreado multidirecional, utilizou-se a substituição de paleta de cores Spectro Full Bright, o que melhorou a visualização das imagens através do aumento no contraste de cores (Sawatzky *et al.* 2010).

As Figuras 4.2a e 4.2b ilustram um exemplo de aplicação desta paleta em uma área onde as rochas estão fortemente estruturadas, com a ocorrência de dobras, bandamentos e falhas.

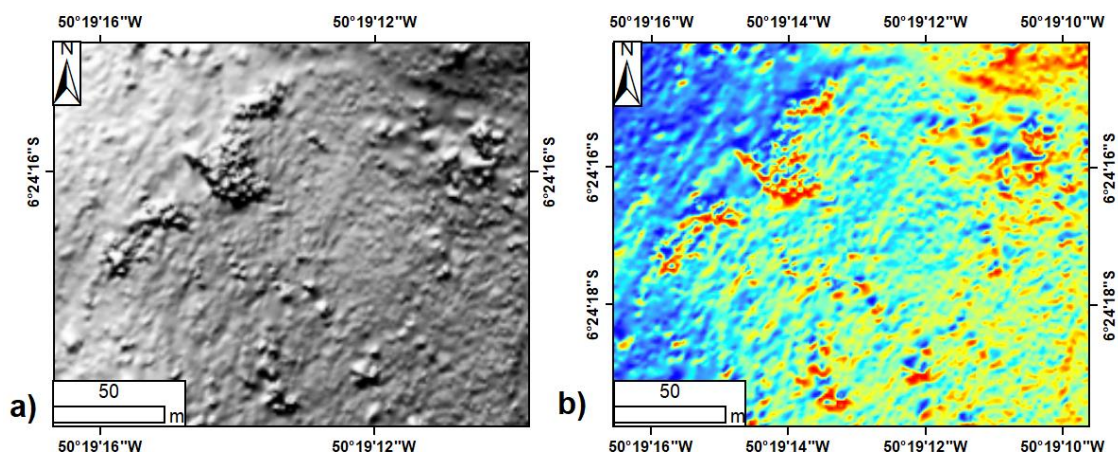


Figura 4.2 – Métodos utilizados para realce de lineamentos – a) modelo de relevo sombreado com paleta de tons de cinza e, em b) modelo de relevo sombreado com paleta de cores substituída pela paleta de cores Spectro Full Bright

4.3.2.2 Filtragem Laplaciana sobre Modelo de Relevo Sombreado – (FLMRS)

Os filtros laplacianos são um tipo de filtro de convolução comumente utilizado em dados de sensoriamento remoto para mapear lineamentos. São filtros que utilizam a segunda derivada para realçar bordas, sem considerar a direção. (Saha *et al.* 2002, Ali & Pirasteh 2004, Ricchetti & Palombella 2005, Grebby *et al.* 2011, Meneses & Almeida 2012). A filtragem laplaciana foi aplicada às imagens MDT LiDAR, utilizando uma grade *kernel* de 3 x 3 pixels com uma estrutura de ponderação tal como na Figura 4.3. Após a aplicação do filtro, os lineamentos foram realçados na nova imagem, sendo identificados como bordas lineares bem definidas, acentuadas pelo filtro laplaciano aplicado, apresentando diferenças de cores acentuadas e contrastantes, como pode ser visualizado da Figura 4.4a. Novamente, para realçar o contraste entre as variações de níveis de cinza, nas imagens resultantes da filtragem Laplaciana, utilizou-se a substituição de paleta de cores *Spectro Full Bright*, o que melhorou a visualização das imagens através do aumento no contraste de cores 4.4b.

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Figura 4.3 – Estrutura de ponderação do kernel de 3x3 pixels utilizados na filtragem laplaciana

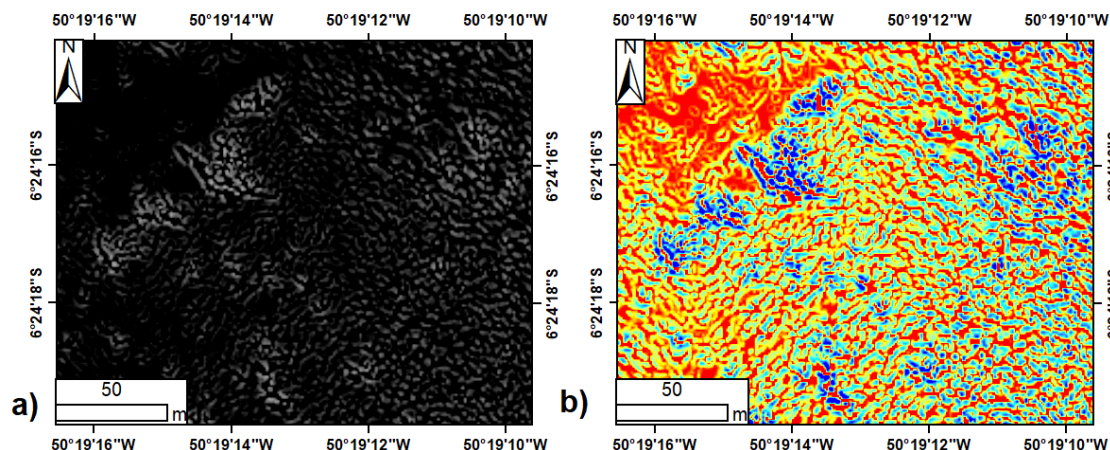


Figura 4.4 a) imagem resultante do processo de filtragem laplaciana sobre relevo sombreado multidirecional, e a) imagem resultante do processo de filtragem laplaciana sobre relevo sombreado com paleta de cores Spectro Full Bright

Em ambos os casos analisados, os lineamentos foram realçados e facilmente identificáveis na nova imagem, como bordas lineares definidas e com diferenças de cores acentuadas, em face do olho humano ter dificuldade de perceber as diferentes tonalidades dos tons de cinza, essa paleta de cores, que apresenta quebras abruptas nas cores, visa realçar sobremaneira as diferenças sutis, antes apresentadas em níveis de cinza. Foi então preparado dois conjuntos de imagens para a extração de lineamentos. A imagem MDT multidirecional com substituição de paleta de cores pela paleta *Spectrum Full bright*. E o segundo conjunto de imagens MDT sombreado submetido a filtragem Laplaciana com substituição de paleta de cores pela paleta *Spectrum Full bright*.

4.3.3 Mapeamento de lineamentos

Para a vetorização dos lineamentos nas imagens realçadas, uma abordagem sistemática foi adotada em uma tentativa de melhorar a consistência e a objetividade no processo de mapeamento de lineamentos. Utilizou-se o *software* ArcGis 10.4 para a vetorização dos lineamentos nas imagens gerados a partir dos dados LiDAR. No processo de vetorização dos lineamentos, as imagens realçadas, foram individualmente exibidas em uma janela, na tela do computador, e foram testadas diversas escalas de observação, definindo-se por padrão uma escala regional de 1:30.000 para observar feições estruturais de caráter regional e uma escala local de 1:5.000 para observa as feições de escala de detalhe. Este procedimento visou assegurar que toda a área fosse submetida a um exame visual em uma mesma escala de observação (Parsons & Yearley 1986, Grebby *et al.* 2011, 2012).

Excluídos os lineamentos de natureza artificial, procedeu-se a extração de traços

de natureza geológica. Tal tarefa foi realizada na tela do computador utilizando a ferramenta *trace* do *software* ArcGis 10.4. Após a extração dos lineamentos das imagens LiDAR realçadas, foram exportados como *Shapefile* para a análise estrutural. Esses traços de lineamentos mapeados de natureza geológica estão relacionados aos bandamentos, as falhas e fraturas das rochas aflorantes.

4.3.4 Análise e Validação de Lineamentos

Os mapas de lineamentos gerados foram analisados para avaliar a utilidade do uso dos dados LiDAR para mapeamento em geologia estrutural. Para alcançar os objetivos deste trabalho utilizou-se o modelo de análise estatística do *software* SPRING (Sistema de Processamento de informações Georeferenciados) (Câmara *et al.* 1996). A partir desta análise foi possível representar os *trends* estruturais e suas frequências de ocorrência. A distribuição espacial dos lineamentos foi analisada por meio de mapas de densidade de lineamentos, confeccionados a partir da ferramenta “*Line Density*”, no módulo “*Spatial Analyst*” presentes no “*Arc Tolls Box-ArcGis 10.4*”, com um raio de busca de 250 m, que segundo (Grebby *et al.* 2011), apresenta o melhor raio de busca para a escala de trabalho em questão.

Para validar os dados de lineamentos extraídos do LiDAR, realizou-se levantamento de campo para coletar de dados estruturais, em áreas chaves. Estas áreas foram examinadas a partir do estudo de painéis de afloramentos, com o objetivo de avaliar os resultados dos mapas de lineamentos gerados a partir interpretação visual de imagens LIDAR realçadas. Oito painéis distribuídos na área de estudo receberam nomeação de a) a h). As localizações desses painéis estão nas figuras dos referidos painéis. Os dados estruturais coletados em campo foram plotadas no *software* *OpenStereo* (Grohmann *et al.* 2011), para a geração de estereogramas cujos resultados comparados com aqueles dos lineamentos extraídos das imagens LiDAR realçadas.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Dados estruturais coletados em campo

As estruturas mapeadas nas rochas ferríferas observados na área de estudo e caracterizadas nos painéis descritos em campo são representadas, principalmente, por bandamentos e falhas. A Figura 4.5a e 4.5b refletem nas rochas ferríferas com bandamentos rotacionados e inclinados, bem como as estruturas primárias, os acamamentos sedimentares, com dobras centimétricas a decimétricas e de fraturas na

direção NNW e NW. A Figura 4.5c ilustra os bandamentos rotacionados pela interferências de falhas na direção NNE, formando dobras tipo kink bands. Enquanto na Figura 4.5d o bandamento do minério de ferro está rotacionado devido a interferência de dois conjuntos de falhas, um de direção NW-SE e outro de direção NE-SW. Esses conjuntos de falhas rotacionaram os bandamentos em diversas direções. As Figuras 4.5e, 4.5f e 4.5g apresentam os bandamentos do minério de ferro dobradas com eixo das dobras com caimento geral para NE. As Figuras 4.5e e 4.5f apresentam estruturas rúpteis, falhas, cortando-as na direção NNE e NE, enquanto a Figura 4.5g apresenta uma falha de direção NW-SE rotacionando o bandamento do minério de ferro formando uma dobra. A Figura 4.5h apresenta o bandamento do minério totalmente transposto e no meio da estrutura é possível observar fragmento de minério de ferro envolto por material argiloso em forma de amêndoas.

No geral, as estruturas bandadas do minério de ferro estão dispostas como um conjunto de faixas, por vezes anastomóticas, comumente curvas ou arqueadas, contínuas, com traços retilíneos, seccionados ou não por falha e fraturas. Geralmente, os traços mais retilíneos estão relacionados ao paralelismo dos bandamentos das zonas de cisalhamento na área. No campo, o bandamento foi observado em diversas orientações e ângulos de mergulho distintos, muito embora estas orientações, localmente, refletem a influência dos falhamentos, que causaram a rotação dessas estruturas, esse comportamento foi observado em todos os painéis. As principais direções dos bandamentos observadas nas rochas ferríferas foram NE-SW, NW-SE, NNE-SSW, NNW-SSE e E-W. Enquanto as falhas apresentaram uma distribuição concentrada nas direções, NE-SW, NW-SE, NNE e NNW.

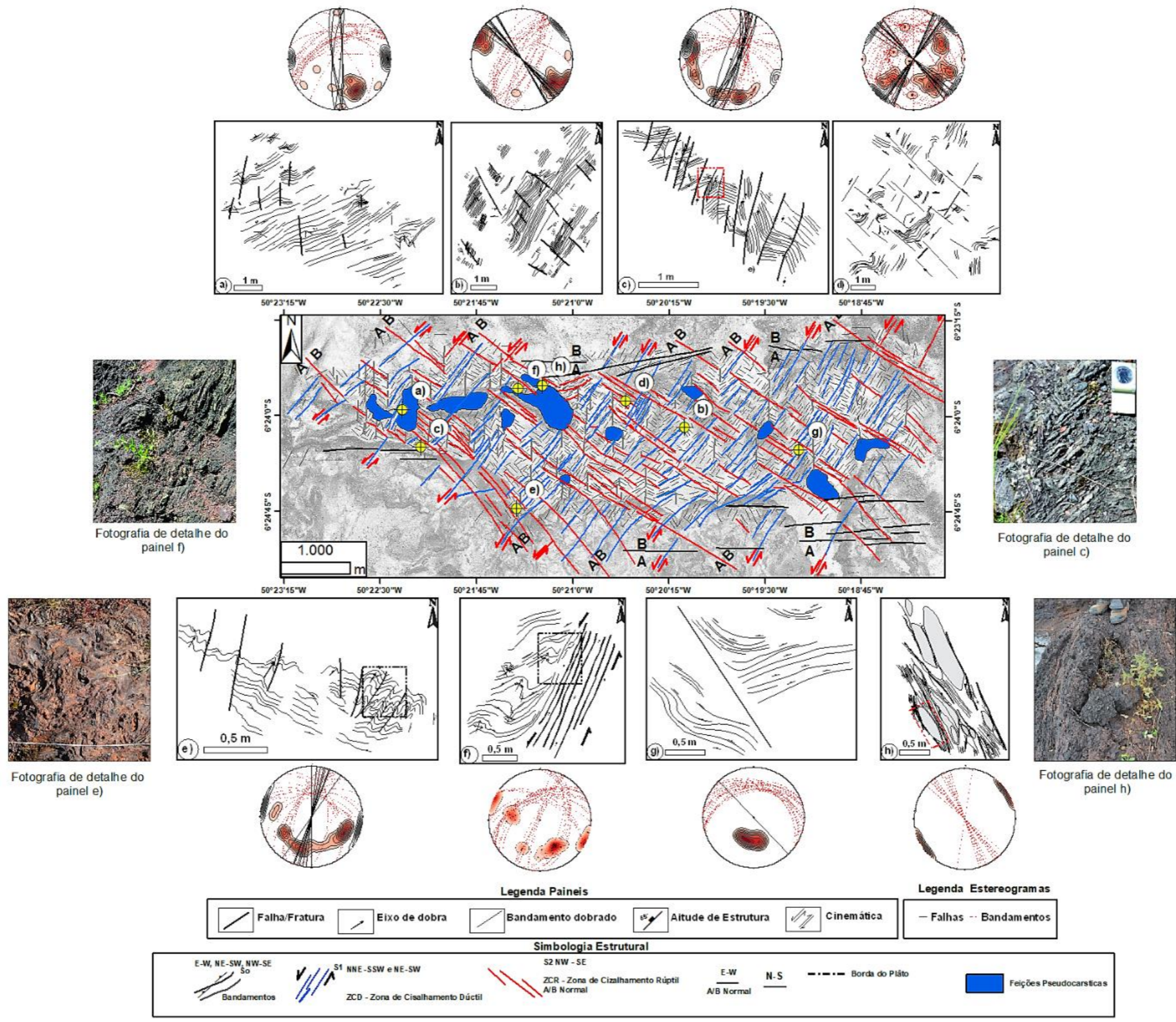


Figura 4.5 – Painéis de estruturas mapeadas nas rochas ferríferas. Dados estruturais coletados na pesquisa de campo ao longo de 8 painéis, plotados em diagrama de projeção estereográfica de igual área conforme indicado no mapa , as letras de a) a h) correspondem a localização dos dados dos estereogramas : a e b) bandamentos com dobras centimétricas, , c) Dobras tipo kink Bands, cortadas por falhas de direção NNE, d) Bandamentos em rocha ferrífera cortados por falhas NW-SE e NE-SW; e) Bandamentos em rocha ferríferas cortados por falhas NE-SW desenhando guirlandas de dobras, f) Transposição de Bandamento em rocha ferrífera pela ação de um conjunto de falhas de direção NE-SW , g) , Bandamentos em rocha ferrífera cortados por falhas NW-SE e NE-SW, h) rochas ferríferas e vulcânicas cisalhadas na direção NW-SE.

O estereograma da Figura 4.5a mostra pouca variação na direção das atitudes dos bandamentos, com a presença de dobras centimétricas e eixo com caimento para NNE e orientação para NE. Falhas e fraturas são visíveis com orientação NNE e NNW. O estereograma da Figura 6c ilustra atitudes de bandamento na forma de uma guirlanda de dobra. Nestas rochas, a estrutura predominante é o bandamento com eixo mergulhando para NE, e falhas com orientação para NE sub vertical. O estereograma da Figura 4.5e apresenta forte semelhança com o estereograma dos bandamento representado na Figura 4.5c, no entanto o caimento do eixo é para NNE - NNW, com falhas intersectando o bandamento na direção NNE. Na Figura 4.5f, o estereograma mostra que as atitudes do bandamento desenharam uma guirlanda de dobra, com eixo com caimento para NE e as falhas apresentam direção NE sub vertical. O estereograma da Figura 4.5h mostra a transposição do bandamento da rocha ferrífera que se apresentam concordante com as falhas de direção NW-SE. Na Figura 4.5d, o estereograma mostra que as atitudes dos bandamentos da rocha ferrífera neste painel apresentam-se rotacionados pela influência de falhas, uma de direção NW-SE e outra NE-SW. Na Figura 4.5b, o estereograma apresenta dados de bandamentos com direção geral NE-SW, seccionadas por falhas de direção NW-SE. Na Figura 4.5g, o estereograma mostra as atitudes do bandamento com guirlanda de dobra, e eixo com caimento para NNE e falha cortando as rochas na direção NW-SE.

Em resumo, nos painéis onde os bandamentos são rotacionados por um conjunto de falha, os estereogramas desenharam guirlandas com eixos de caimento para NE/NNE (4.5a, b, c, e, f, g). No estereograma da Figura 4.5d são observados dois conjuntos de falhas, NE-SW e NW-SE, que rotacionaram o bandamento e desenharam guirlandas com eixo de caimento para NW. Portanto, os dados de campo indicam a presença de dois conjuntos de falhas principais, um NE-SW, e outro NW-SE. Estas falhas afetam a geometria das estruturas prévias presentes na área. Outras falhas com menor frequência foram também observadas, com direção E-W e N-S.

4.4.2 Mapeamento estrutural a partir do LiDAR aerotransportado

A interpretação visual das imagens dos MDTs LiDAR realçados permitiu a elaboração de dois mapas de lineamentos, representativos de acamamentos e traços de falhas e/ou fraturas nas rochas ferríferas.

Os mapas e os diagramas de roseta mostram a dominância dos *trends* estruturais NE-SW e NW-SE, e *trends* secundários nas direções NNW-NNE e E-W (Figura 4.6). A

análise comparativa entre os dois mapas mostra semelhanças verificadas a partir dos diagramas em roseta construídos com relação à frequência e ao comprimento absoluto. Os dados estatísticos apresentados na (Tabela 4.1) resultante desse processamento, indicam as principais diferenças e concordâncias entre as feições mapeadas. Os resultados apresentados na matriz de correlação das frequências e comprimentos absolutos das direções dos lineamentos mostram uma boa correlação entre os diferentes produtos gerados. As distribuições, tanto das frequências dos lineamentos, quanto dos comprimentos acumulados, em ambos os mapas (Figura 4.6), indicam a existência de quatro grupos de lineamentos estruturais, em ordem decrescente de importância:

Grupo 1: O trend N-S apresenta a menor densidade na área de estudo. A distribuição desta estrutura apresenta maior concentração à oeste da área (Figura 4.7a e b), diferenciando-se das derivadas da filtragem laplaciana, (Figura 4.6b) que mostram uma distribuição mais uniforme que as derivadas do modelo de relevo sombreado (Figura 4.7a). Em ambos os mapas, os traços desenham estruturas contínuas e retilíneas, algumas vezes interrompidas, com comprimentos que variam de 0,1 km a 1,5 km, chegando até 3 km; com espaçamento variável 0,2 a 2,0 km (Figura 4.6 a e b). A Figura 4.6b mostra que essas estruturas ocorrem, em sua maioria, no cruzamento das estruturas NE-SW e NW-SE, marcando zonas de interferência, com estruturas dobradas em *kink bands* (Figura 4.5c)

Grupo 2: Os lineamentos seguem o trend NE-SW e desenham estruturas contínuas a descontínuas, fortemente anastomóticas e entrelaçadas, pouco espaçadas, com feixes divergentes, saindo de NE-SW para N-S (Figura 4.6a e b). Apresentam comprimentos que variam de 200 m a até > 500 m, com espaçamentos entre 50 metros a 100 m. Esses lineamentos apresentam densidade relativa alta e apesar de apresentar ampla distribuição, sua maior concentração está na parte centro leste da área de estudo (Figura 4.7c e d).

Grupo 3: Os lineamentos com trend E-W apresentam maior concentração nas áreas Norte e Sul, apresentado forte controle estrutural rotacionados-os (Figuras 4.6a e b). Mapas de densidades de lineamentos apresentam configuração próximas (Figura 4.7e e f).

Grupo 4: Os lineamentos com o trend NW-SE desenham estruturas contínuas a descontínuas, parcialmente anastomóticas e entrelaçadas, pouco espaçadas, com feixes divergentes quanto a direção, saindo do eixo NW-SW e aproximando-se do E-W. Apresentam comprimentos que variam de 200 m a até 500 m, com espaçamentos de 50

metros a 100 m (Figuras 4.6a e b). Esses lineamentos apresentam densidade relativa alta, sua maior concentração e na parte centro oeste da área de estudo (Figura 4.7g e h).

Os mapas e diagramas de rosetas elaborados a partir dos produtos LiDAR apresentam os mesmos trends estruturais observados com dados de campo. A frequência absoluta e o comprimento absoluto dos lineamentos entre os mapas de lineamentos de modelo de relevo sombreado e de filtragem laplaciana de MDT, mostram uma correlação de 0,79 e 0,73, respectivamente, utilizando o coeficiente de Pearson (Congalton & Green 2008) (Tabela 4.1). Os referidos diagramas de rosetas apresentam concordâncias quanto ao trend dos lineamentos. Algumas diferenças entre os resultados obtidos pelos dois métodos ficaram evidentes, principalmente no que diz respeito a dispersão das orientações dos lineamentos (Figura 4.7). Um maior número de lineamentos foi identificado utilizando o relevo sombreado. No entanto, a filtragem laplaciana apresentou a melhor distribuição de lineamentos perceptíveis em toda a área investigada. A melhor visualização de contrastes se deu quando foi substituída a paleta de cores de tons de cinza pela *spectrum full brighth*. Isso permitiu um aumento considerável no número de lineamentos identificados, o que sugere que os lineamentos, são ressaltados pelo uso dessa paleta de cores.

Mapas de densidade de lineamento podem ser usados para auxiliar a determinar a diferença de abundância entre mapas em uma mesma área. Se dois mapas de densidade de lineamentos, com abundâncias de lineamentos , consideravelmente diferentes, exibem uma forte correlação, então eles podem, essencialmente, ser considerados equivalentes, enquanto uma fraca correlação sugere que os dois mapas contêm informações diferentes (Parsons & Yearley 1986). O coeficiente de correlação entre os mapas de densidade de lineamentos, divididos por trend estrutural, ficou entre de 0,73 e 0,80. Este resultado sugere que os mapas contêm as mesmas informações, embora haja variações na orientação e na abundância dos lineamentos. Os resultados da análise de correlação mostram fortes correlações entre todos os mapas analisados (Tabela 4.1).

Figura 4.6 – a) Mapa de lineamentos gerado a partir da interpretação do Modelo de relevo sombreado, com a substituição da paleta de cores de tons de cinza, pela paleta Spectro Full Bright. b) Mapa gerado a partir das imagens LIDAR realçadas por filtros laplacianos com substituição da paleta de cores de tons de cinza, pela paleta Spectro Full Bright. Em c) e d) Diagrama de Rosetas em frequência absoluta mostrando a distribuição dos lineamentos em ambos os mapas analisados. Em e) e f) Diagrama de Rosetas em Comprimento absoluto mostrando a distribuição dos lineamentos em ambos os mapas analisados.

Tabela 4.1 - Matriz de Correlação das frequências absolutas e Comprimento absoluto das direções dos lineamentos

Frequência absoluta		
	<i>Modelo Relevo Sombreado</i>	<i>Modelo Laplaciano</i>
<i>Modelo Relevo Sombreado</i>	1	
<i>Modelo Laplaciano</i>	0,80	1
Comprimento Absoluto		
	<i>Modelo Relevo Sombreado</i>	<i>Modelo Laplaciano</i>
<i>Modelo Relevo Sombreado</i>	1	
<i>Modelo Laplaciano</i>	0,74	1

Figura 4.7 – Mapa de densidade de lineamentos derivados dos mapas de lineamentos gerados através de interpretação visual de Modelo de relevo sombreado e filtragem laplaciana de modelo digital de terreno derivado do LiDAR

4.4.3 Significância dos trends estruturais e suas implicações

Os dados de medidas estruturais coletadas em campo mostram que as falhas e bandamento apresentam dois principais trends, NW-SE e NE-SW com mergulho sub vertical e subordinadamente N-S e E-W (Figura 4.5). Estas observações estão de acordo com os estudos proposto por (Resende & Barbosa 1972) em seu mapeamento na escala de 1:25.000. Estas observações foram também propostas por Oliveira (2002) na parte sudeste do Sistema de Transcorrência Carajás. As variações das atitudes dos bandamentos estão intimamente associadas a presença de falhas que tendem a paralelizar as referidas estruturas (Figura 4.5c). Essa interferência gera dobras dúcteis-rúpteis e rúpteis em *kink bands*.

A relação geométrica dos lineamentos extraídos do MDT LiDAR, principalmente com filtro laplaciano, indica que os lineamentos N-S, NW-SE e NE-SW truncam e, por vezes, deslocam aqueles de direção E-W. Os lineamentos com padrão NW-SE e NE-SW apresentam relações de truncamento e deslocamento mútuas, enquanto os lineamentos N-S são aparentemente os mais contínuos, apresentando situações de truncamentos generalizadas com os demais padrões (NE-SW, E-W e NW-SE).

Com base nessa relação espacial, pode-se supor que os conjuntos de traços com padrão E-W são os mais antigos e representam os mais penetrativos da área investigada. Entre os NW-SE e NE-SW a relação mostra que existe uma reciprocidade de truncamentos e deslocamentos entre ambos. Ao avaliar essas relações de truncamento, observa-se que os traços NW-SE cortam e deslocam mais frequentemente os NE-SW, podendo-se inferir que aquele seja aparentemente mais novo que esse. Os de padrão N-S possivelmente são os mais novos já que truncam e deslocam todos os outros sistemas (E-W, NE-SW e NW-SE)

A cinemática dessas estruturas foi interpretada a partir das relações de deslocamentos aparentes dos lineamentos extraídos dos dados MDT LiDAR. No mapa observa-se lineamentos NE-SW truncando e deslocando aqueles E-W, denotando aparentemente uma cinemática de domínio direcional sinistral. Para a relação cinemática entre os sistemas NW-SE observa-se que eles deslocam e truncam, aparentemente àqueles E-W com cinemática direcional dextral. A Figura 4.8 mostra as

relações de truncamento das estruturas N-S, NW-SE e NE-SW, acima descritas, onde observam-se que as estruturas E-W truncam as demais.

Figura 4.8 – Mapa mostrando detalhe das relações de truncamento das estruturas extraídas do MDT-LiDAR, em a) e em b) e demonstrado como se dá o cruzamento das estruturas de direção N-S, NW-SE e NE-SW

4.4.4 Fatores que limitam o reconhecimento da geometria da trama estrutural

As imagens LiDAR fornecem uma ótima visão da área de estudo para análise estrutural, apesar do intenso intemperismo da rocha, destacando as tramas estruturais e suas relações com a cobertura vegetal. Esses dados fornecem melhorias significativas

em relação a fotografias aéreas e imagens de satélite convencionais, no reconhecimento de diversas feições estruturais e geomorfológicas (Schumann *et al.* 2008, Scheiber *et al.* 2015). As imagens LIDAR mostram as diferenças de texturas e de rugosidades das áreas de ocorrência de afloramentos de formações ferríferas bandadas – FFB (Canga Estruturada) e depósitos detríticos resultados do processo de intemperismo (Canga Detritica) (Santos 2016). A cobertura de sedimentos detríticos limitou em alguns locais a utilidade dessas imagens.

Os lineamentos interpretados, associados a trama estrutural foram estudados a partir da observação em janelas de afloramentos com cobertura parcial de rocha detrítica, sob forte intemperismo do minério e mascarados pela solubilização de óxidos e hidróxidos de ferro.

A expressão topográfica da trama estrutural é função da litologia, da estruturação geológica e dos processos de erosão e intemperismo (Soares & Fiori 1976). Embora a altimetria do MDT LiDAR registre a topografia em alta resolução, com reflexos em alterações na litologia e nas estruturas geológicas, a possibilidade da rocha de formar topografia em pequena escala (microtopografia) é crítica.

A micro-topografia é o produto de processos relativamente sutis dos processos de intemperismo físico e químico, e que são sensíveis a alterações da litologia e/ou estruturais sutis (Pavlis & Bruhn 2011, Dyess & Hansen 2014). A rocha mãe na área de estudo sofreu um processo de lixiviação intenso, estudos petrográficos, realizados por diversos pesquisadores na área, permitiram observar as mudanças texturais e mineralógicas ocorridas no jaspilito, desde pouco alterado até sua transformação em minério de ferro. Constatou-se que, quanto mais alterada é a rocha, maior o número de micro-cavidades de dissolução, que se concentram nas bandas silicosas (Maurity & Kotschoubey 2005, Auler *et al.* 2014, Piló *et al.* 2015, Abreu *et al.* 2016, Cabral *et al.* 2016). O jaspilito alterado apresenta maior quantidade de hematita e goethita e menor quantidade de *chert* e *jaspe*.

A solubilização da sílica acarreta redução de volume da rocha levando, após a dissolução, ao dismantelamento das bandas residuais e até erosão em subsuperfície (Abreu *et al.* 2016, Cabral *et al.* 2016). A variabilidade de volume das BIF durante o intemperismo já foi ressaltada anteriormente por outros autores. (Barley *et al.* 1999, Taylor *et al.* 2001), apontam reduções de espessura da FFB em *Hamersley* da ordem de 50%. (Wirth *et al.* 1986) assinala perda de 30% a 50% de massa do jaspilito de Carajás durante o intemperismo. Ribeiro and Carvalho (2002) e Ribeiro (2003) estimam um

valor de redução de volume da ordem de 30%. Tais processos destroem a micro topografia e resultam na formação de blocos esparsos na superfície topográfica. Apesar da dificuldade em extrair informações estruturais nessas condições, os métodos utilizados realçaram as estruturas e, os *trends* estruturais foram corroboradas com os dados de campo, embora alguns autores não recomendam o uso de LiDAR em áreas tropicais para extração de informações estruturais (Pavlis & Bruhn 2011).

4.5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstraram o potencial significativo para produzir mapas estruturais detalhados e abrangentes de forma eficiente, usando dados LiDAR aerotransportados na complementação do mapeamento geológico-estrutural. Embora os resultados deste estudo tenham relevância direta para o mapeamento estrutural das FFB na área do corpo de minério S11D, observa-se que os dados LiDAR aerotransportados de alta resolução possam ser utilizados para melhorar o mapeamento estrutural detalhado em outras áreas na Serra dos Carajás, visto que existe disponibilidade de informações de cobertura de dados LIDAR aerotransportados para quase a totalidade da Serra dos Carajás.

Com a capacidade de adquirir dados topográficos de alta resolução em terrenos densamente florestados, o LiDAR aerotransportado tem o potencial de ser uma ferramenta valiosa para muitos aspectos do mapeamento estrutural em qualquer configuração geológica, independentemente da cobertura vegetal. No entanto, em cada caso, a eficácia do dado LiDAR dependerá da geração de um MDT adequado. Em terrenos densamente florestados, isso pode exigir uma alta densidade de pontos LiDAR, ou um aumento da faixa de sobreposição das linhas de voos, visando aumentar o número de retornos do solo. Embora, o mapeamento estrutural detalhado, utilizando uma abordagem manual traga maior confiabilidade, requer maior tempo de interpretação. Entretanto, esta ainda é a alternativa mais confiável, até que novos algoritmos computacionais automatizados de extração de lineamentos tornem-se mais eficientes para mapear feições estruturais crustais, e não antropogênicas.

CAPITULO 5 - PADRÃO DE DEFORMAÇÃO EM ROCHAS FERRÍFERAS ARQUEANAS: EXEMPLO DA REGIÃO SUL DA SERRA DOS CARAJÁS, BORDA LESTE DO CRATON AMAZÔNICO. BRASIL

5.1 INTRODUÇÃO

A importância das rochas ferríferas arqueanas na história da Terra, se dá pelo fato de trazerem informações importantes quanto à história precoce da hidrosfera, ambientes tectônicos e processos sedimentares e a emergência da vida. Rochas ferríferas com essa idade ocorre em todo mundo e geralmente exibem padrões estruturais complexos que envolvem condições tectônicas especiais como por exemplo no Greenstone Pilbara na Austrália (Hickman 2001); no Grenstones Abitibi nos EUA (Ropchan *et al.* 2002); no Barbeton na Africa do Sul (Ronde & Wit 1994, Lowe *et al.* 1999); em Kiruna na Suécia (Lindblom *et al.* 1996); Simandou na República da Guiné (Cope *et al.* 2008); Lago Superior nos EUA (Marsden 1977); Rio das Velhas e Quadrilátero Ferrífero no Brasil (Rosière & Chemale Jr 2000) e na Província Mineral de Carajás (Tolbert *et al.* 1971).

Sob o ponto de vista econômico as rochas arqueanas guardam os mais importantes depósitos de ferro do mundo. No Brasil, as rochas ferríferas bandadas podem ser separadas em dois grupos distintos, quanto ao volume e tipo de minério relacionado: (1) ocorrências de menor volume, intercalados com gnaisses arqueanos de alto grau, como por exemplo o depósito de ferro de Jambreiro em Guanhanês no estado de Minas Gerais (Borges *et al.* 1979, Barrote *et al.* 2017); e (2) os depósitos gigantes, de classe mundial, associados a sequências de cobertura sedimentar ou vulcânico-sedimentar de idade neoarqueana a paleoproterozóica, como por exemplo Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, (Dorr 1969, Rosière & Chemale Jr 2000), Serra dos Carajás na Amazônia (Tolbert *et al.* 1971, Resende & Barbosa 1972, Olszewski *et al.* 1989, Pinheiro & Holdsworth 1997b). No Brasil destaca-se o fato de que as investigações geológicas nestas rochas têm sido voltadas mais particularmente para aspectos estratigráficos, petrológicos e geoquímicos (Beisiegel *et al.* 1973, Beisiegel 1982, Docegeo 1988, Lindenmayer *et al.* 2001, Macambira 2003b, Santos 2003), com menor ênfase na organização estrutural e de deformação dessas rochas (Pinheiro & Holdsworth 1997a, 1997b, 2000a, Rosière *et al.* 2006).

O depósito de minério de ferro neoarqueano da Serra dos Carajás, no contexto do Craton Amazônico, (Figura 2.1 e 2.2) é atualmente o maior complexo de minas de

ferro em extração no mundo (Vale S. A. 2013). Em comum com muitas outras rochas ferríferas brasileiras, as rochas na Serra dos Carajás apresentam padrões estruturais relativamente complexos com dobramentos e falhamentos sobrepostos. Na região de Carajás os depósitos se posicionam nas bordas norte (Serra Norte) e sul (Serra Sul) da estrutura e somente aquelas dispostas na Serra Norte têm sido investigadas sob o ponto de vista estrutural (Pinheiro 1997, Pinheiro & Holdsworth 1997b, Domingos 2003, Veneziani *et al.* 2004, Rosière *et al.* 2006).

Estudos geológicos das rochas na Serra Sul datam da década de 70 (Tolbert *et al.* 1971, Resende & Barbosa 1972). Trabalhos de cunho regional têm mencionado essas rochas no contexto da história evolutiva da região, mas sem investigar maiores detalhes (Pinheiro & Holdsworth 1997a, 1997b, 2000a, Veneziani *et al.* 2004, Rosière *et al.* 2006).

Na parte central da Serra Sul está inserido o depósito S11D (Figura 1.1), com uma área de cerca de 19 km², onde o minério de ferro de idade Arqueana (Grupo Grão Pará, 2,76 Ga (Wirth *et al.* 1986, Machado *et al.* 1991, Trendall *et al.* 1998) está disposto como um corpo alongado na direção E-W, com cerca de 8 km de comprimento, com largura variando entre 800 m a 2.500 m e espessura entre 20 a mais de 350 metros. Tem volume calculado de 3,4 bilhões de ton, com aproximadamente 66% de teor de ferro. O minério é constituído basicamente de hematita friável (97%), hematita compacta (1%) e hematita manganésifera (1%), com relação estéril/minério de 0,5/1 (Vale 2008).

Neste estudo serão apresentados dados estruturais em diferentes escalas, com base em observações de campo e apoio de sensores remotos (Radar SRTM, LiDAR, Imagens Óticas, Ikonos, Quick Bird e fotografias aéreas), interpretados sob o ponto de vista da deformação contínua, contextualizados no arranjo regional da borda leste do Craton Amazônico. O estudo pretende contribuir no entendimento da complexidade da deformação das rochas ferríferas a partir da escala de detalhe, e exemplificar essa ocorrência no contexto da história arqueana da Terra, em relação com diferentes regiões do mundo.

5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

5.2.1 Metodologia

Este estudo baseou-se em dados de campo, com coleta de atitudes de planos e linhas geológicas com base na análise geométrica. Foram estudados pontos a partir de

painéis de afloramentos das rochas ferríferas. A abordagem da deformação das rochas na área mapeada se deu de acordo com a organização geométrica e cinemática das estruturas com base no conceito de fluxo de deformação.

A análise geométrica teve como base o comportamento espacial das estruturas e seus elementos de trama a partir dos dados das atitudes do bandamento presente nas rochas ferríferas exposto nos afloramentos. Nos afloramentos foram observados dois conjuntos de dados, estruturas mesoscópicas e a trama das rochas, os dois foram integrados para a análise geométrica.

Os dados foram organizados em mapas temáticos, com um total de 802 medidas de bandamentos do minério de ferro, e geração de mapa na escala de 1:5.000. Os dados das atitudes dos bandamentos das rochas ferríferas foram fornecidas pela empresa Vale S.A. via projeto de *Levantamento Geoespeleológico da Unidade Geoespeleológica de Carajás, Província Mineral de Carajás (PROCAV)*. A interpretação desses dados estruturais foi realizada visualmente a partir da interpolação das atitudes das camadas (Figura 2.3), gerando um mapa de curvas de contornos estruturais ou *strike line* (Lisle 1996, Bennison *et al.* 2013).

Os episódios da história geológica deformacional do platô S11D foi modelado utilizando o *software Visible Geology*, disponível em app.visiblegeology.com. Esse *software* utiliza algoritmo desenvolvido utilizando o MATLAB por Rowna Cockett da Universidade de Calgary, Canadá (Cockett 2018).

5.2.2 Resultados

A combinação de informações geométricas sobre o bandamento, lineação e parâmetros de dobras, combinados com os indicadores cinemáticos organizados em mapas e seções geológicas.

5.2.2.1 Bandamentos do minério de Ferro

Natureza e origem do bandamento

As rochas ferríferas do platô S11D compreendem camadas com fina laminação interna (10-25mm) a muito finas (<10 mm), subparalelas, por vezes onduladas, paralelas curvadas ou somente onduladas não paralelas (usando a classificação de Collinson & Thompson 1988 *in* Woodcock 1989). Quando observadas em lâminas delgadas (Figura 5.1), a laminação das rochas ferríferas é definida por variações composicionais de

hematita, martita e de magnetita, com quartzo microcristalino e chert (Cabral 2016, Macambira 2003). É possível observar, tanto em macroescala quanto em microescala, exemplos de gradação do acamamento e estruturas de deformação são preservados (Gibbs & Wirth 1990, Macambira & Silva 1994). Essas observações sugerem que o bandamento observado tem natureza sedimentar primária.

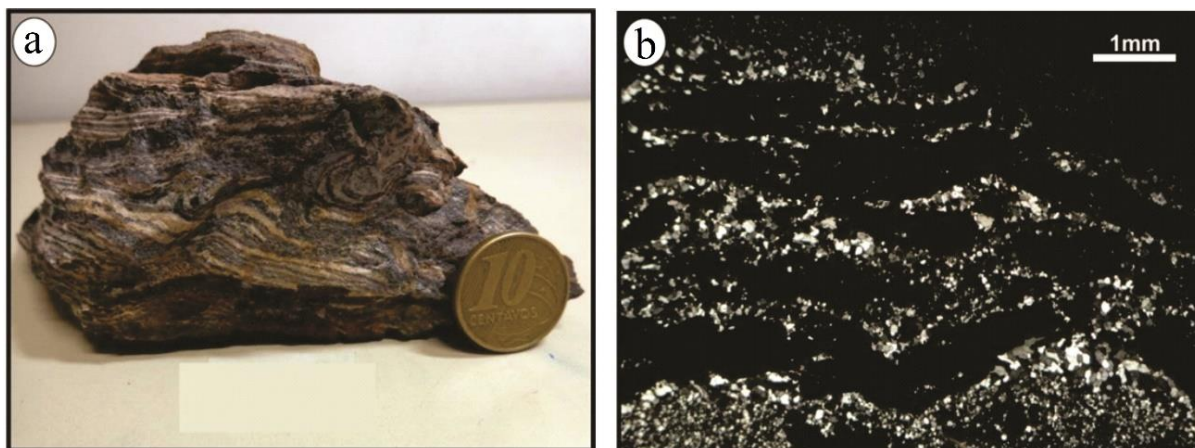


Figura 5.1 – a) jaspilito alterado, com bandamento definido por alternância entre bandas de opacos e bandas de chert; b) Alternância entre a banda de opacos e a banda silicosa composta por chert e cristais de quartzo. As bandas apresentam-se dobradas. Nicóis cruzados(2.5x)

Tem sido sugerido que parte do acamamento presente nas rochas ferríferas tem origem tectônica, formada por milonitização e metamorfismo (Marçal 1991). Esta proposta é incompatível com a evidência de uma origem de acamamento primário citada acima e com outros estudos sobre metamorfismo nas rochas ferríferas que sugerem fácies xisto verdes se os efeitos da alteração hidrotermal forem ignorados (Meirelles *et al.* 1984, Wirth *et al.* 1986). Além disso, as texturas de recristalização dinâmicas, típicas dos milonitos não são observadas em lâminas delgadas, embora, a trama de deformação intracristalina estejam presentes em áreas tectonicamente dobradas, essas tramas são de baixa temperatura.

O bandamento do minério de ferro

As rochas ferríferas do platô S11D apresentam o bandamento deformado, notadamente rotacionado. O mapa de contorno estrutural confeccionado a partir das medidas de atitudes adquiridas em campo, mostra o mesmo assume diversas orientações com direções entre N-S, E-W, NE-SW e NW-SE (Figura 5.2).

O bandamento das rochas ferríferas apresenta-se organizado em faixas, com padrões anastomóticos, comumente curvos, contínuos, e por vezes retilíneo. Estes

padrões de deformação estão relacionados a arrastos provocados por estruturas de cisalhamento. Em alguns locais as referidas estruturas, apresentam-se com densidades relativamente altas, e em outras ausentes ou pouco densas, em decorrência do intemperismo, ou por estarem recobertas por material detrítico.

O bandamento das rochas ferríferas com direção N-S é o de menor frequência. No geral, encontram-se distribuídos de forma irregular na área investigada, aparentemente não deslocam as estruturas.

O bandamento das rochas ferríferas com trend E-W mostra-se pouco frequente na área de estudo. Seus traços desenham estruturas relativamente contínuas, essas estruturas sofrem inflecções causadas pelas falhas NE-SW e NW-SE, mostrando-se descontínuas e curvas.

O bandamento com trend NE-SW desenha traços com maior densidade e ampla distribuição na área de estudo. Em alguns locais o bandamento se apresenta reto a fracamente sinuosos, que limitam blocos com diferentes intensidades de deformação, em zonas de cisalhamentos. No interior dos blocos o bandamento torna-se reto a fracamente anastomótico. Essas estruturas são deslocadas, localmente, pelas falhas de direção NW-SE.

O trend NW-SE corresponde a bandamentos de densidade média a alta e ampla distribuição na área de estudo. No geral, desenham estruturas curvas, contínuas, anastomóticas, regulares quanto a suas direções, mostrando-se por vezes retilíneos. No geral, o bandamento das rochas ferríferas desenha estruturas contínuas, regularmente distribuídas na área, fortemente anastomóticas, por vezes retas, com espaçamento irregular, com alguns feixes divergentes.

5.2.2.2 Lineação mineral

A lineação mineral apresenta variação no sentido e no ângulo de caimento. Apresenta-se distribuídas em três quadrantes (NE, SE e SW). As que estão associadas as falhas de direção NE-SW sugerem que o movimento de deslizamento varia desde movimentos de deslizamento horizontal, até 60° de mergulho caracterizando deslizamento oblíquo. Já os associados aos conjuntos de falhas NW-SE sugerem que o movimento de deslizamento variou desde o sentido do mergulho até um ângulo de 40° . A lineação mineral em geral é mal preservada na área. Em seção geológica as estruturas NW-SE apresentaram geometria de movimentação normal a oblíqua deslocando os bandamentos de direção NE-SW (Figura 5.3).

Figura 5.2 – Mapa estrutural gerado a partir dos dados de campo, utilizando o método de interpolação de contorno estrutural, utilizando medids estruturais.

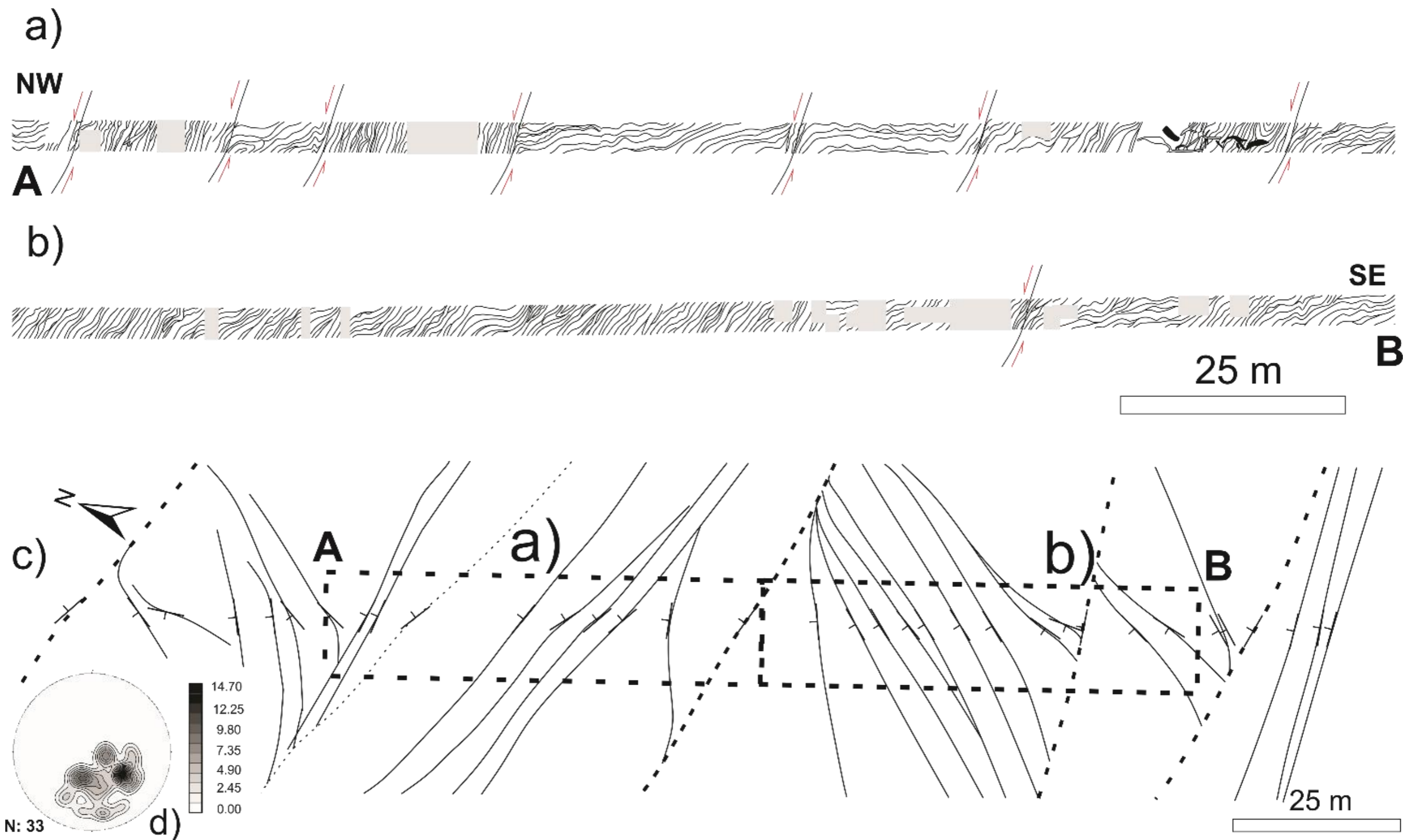


Figura 5.3 – Geometria da posição das rochas e do minério de ferro em perfil e planta na parte leste do platô S11D; a) Seção AB na parte oeste do platô mostrando a bandamento nas rochas ferríferas com direção NW-SE e mergulho alto cortado por falhas normais de direção NW-SE. b) Continuação da Seção AB onde se observa o bandamento com strike NE-SW com dobras e rotações produzidas por arrasto ao longo de falhas normais com direção NW-SE. c) projeção em planta dos perfis mostrando o comportamento da rocha ferrífera. Observar que a maioria das falhas normais estão concentradas na primeira faixa do perfil em a). d) Estereograma para 33 atitudes do bandamento na rocha ferrífera. Observar a dispersão de polos na parte sul da projeção em decorrência da deformação produzida pelas falhas normais. Localização na Figura 5.2

5.2.2.3 Zonas de cisalhamento (ZC) – Transposição

Essas zonas apresentam espessuras variáveis, de milimétricas a dezenas de quilômetros; extensões submilimétricas a centena de quilômetros e podem ser rúpteis ou dúcteis (Ramsay 1980, Costa & Hasui 1991).

A maioria das falhas que compõe essas ZC, que estão expostas no platô é de pequena escala, que aparentemente refletem pequeno deslocamento. Na área foram mapeadas dois sistemas de cisalhamento, um de direção NE-SW e outro de direção NW-SE. O primeiro se comporta de maneira dúctil-rúptil (ZCDR), o segundo se comporta de maneira Rúptil (ZCR). Essas estruturas variam de um a dezenas de metros de largura e são caracterizadas pelo forte rotação do bandamento do minério de ferro ao longo da direção da zona. O mapa estrutural representado pela Figura 2, mostra a disposição espacial dessas estruturas.

A Zona de Cisalhamento Dúctil Rúptil (ZCDR) de direção NE-SW mergulha para o NW e subordinadamente para SE. E a Zona de cisalhamento Rúptil de direção NW-SE mergulha majoritariamente para NE.

As ZCDR de direção NE-SW desenham traços com maior ocorrência e ampla distribuição na área de estudo. Em alguns locais esses bandamentos apresentam atitude planar, com pouca curvatura, limitam blocos com densidade de deformação diferentes, são as zonas de cisalhamentos. No centro desses blocos o plano dessas estruturas apresenta-se anastomóticas, curvos e/ou arqueados. Essas estruturas são deslocadas pelas falhas de direção NW-SE.

As ZCR'S de direção NW-SE corresponde estruturas de densidade intermediária e ampla distribuição na área de estudo. No geral, desenham estruturas contínuas retilíneas gradando a anastomóticas, fora da ZC. Alguns feixes sofrem deflexão para E-W, agrupando-se inicialmente na direção próxima ao eixo E-W. O mapa mostrado da Figura 5.2, mostra a disposição espacial dessas ZC'S.

As ZCDR foram utilizadas para separar os setores de deformação, utilizando-se como critério de separação os limites das principais (ZCDR) de direção NE-SW (Figura 5.6).

5.2.2.4 Dobras

Nas faixas dobradas do platô S11D predominam dois conjuntos principais de dobras de amplitude decamétricas, policlinais en echelon, desenhadas internamente por

dobras menores.

O primeiro conjunto de dobras apresenta eixos caindo com baixo ângulo para NE (Figura 5.4a). Essas dobras, em conjunto, terminam por projetar diversos pares de sinformal/antiformal com dezenas e até centenas de metros que desenha em mapa diversos “M” o que define grosseiramente o contorno sul do platô (Figura 5.4a e 5.5). É o principal conjunto de dobras na área. A vergência dessas dobras aponta para NW e secundariamente SE com plano axial com direção NE-SW (Figura 5.4d). O segundo conjunto apresenta eixo com caimento para SE (Figura 5.4e e f). Esses conjuntos de dobras projetam pares de sinforme/antiforme, cujas vergências apontam para NE e secundariamente SW. Os planos axiais estão dispostos na direção NW-SE (Figura 5.4g).

Nos trabalhos de campo, foram estudados oito painéis de afloramentos, em sete deles as estruturas apresentavam-se com porções dobradas. As dobras, em sua maioria apresentavam ângulos interflancos variando de 30° a 70° classificando as dobras como fechada a cerrada (Figuras 5.5a, b, e, f e g). No perfil geológico é possível observar que essas faixas de dobras são separadas por pacotes de estratos não ou pouco dobrados uniformemente mergulhando entre 20 a 50 graus, muitas vezes existem zonas locais de maior tensão (faixas de até 10 metros de largura) em que as dobras tornam-se apertadas a isoclinal (Figura 5.3a e b).

Outro grupo subordinado de dobras foi reconhecido com base em diferenças de estilo e orientação. Um sistema de *kink bands* com comprimentos de onda de 0,3 a 1,0 m foi observado em uma área próxima a lagoa do amendoim. As *kinks* mergulham para NE e SW e ocorrem como *kinks* monoclinicas isoladas (Figura 5.5c). Os planos axiais em sua maioria apresentam atitude com strike NNE-SSW e mergulhando para o NW e eixo mergulhando para NE. Nesta área ocorrem com frequência maior as falhas de direção N-S.

Figura 5.4 – Sistemas de dobras presentes na área do projeto S11D. a) Painel 01 - sistemas de dobras desenhando sinforme e antiforme em forma de M com eixo caindo para NE, b) detalhe dos sinforme e antifomes cortados por falha de direção NE-SW, c) Fotografia de detalhe do contato das dobras com a falha, d) Estereograma mostrando os elementos geométricos da dobra, e) Painel 02 - afloramento de minério de ferro dobrado, f) fotografia de detalhe, g) Estereograma mostrando os elementos geométricos do bandamento dobrado com eixo caindo para SE e plano axial com vergência para NE, h) mapa de localização dos Painéis analisados

Figura 5.5 – Painéis de afloramentos construídos na área do Platô S11D. a figura mostra a variação dos padrões de dobramentos do minério de ferro na área pesquisada. a) bandamento pouco deformado apresentando dobras centimétricas com eixo caindo para NNE, b) bandamento pouco deformado seccionados falhas/fraturas de direção NW-SE, c) dobras tipo kink bands cortadas por falhas/fraturas de direção NNE, d) minério de ferro cortados por um conjunto de falhas de direção NE-SW e NW-SE, e) dobras apertadas com pequeno ângulo interflancos seccionadas por falhas/fraturas de direção NE-SW, f) dobras fechadas seccionadas por falhas NE-SW, g) minério de Ferro desenhando dobras cortado por falha de direção NW-SE, h) ZCDR com fragmentos de minério de ferro e rocha vulcânica de direção NW-SE..

5.2.2.5 Setores de deformação

Com o objetivo de simplificar a abordagem da deformação das rochas na área mapeada, a descrição dos elementos tectônicos se deu de acordo com a organização geométrica e disposição espacial das estruturas dividindo-as por setores estruturais. Os setores de deformação foram divididos em quatro áreas, utilizando-se como critério de separação os limites das principais (ZCDR) de direção NE-SW.

Setor I

Este setor está localizado na parte oeste da área. Caracteriza-se por uma orientação predominantemente do bandamento na direção NW-SE, (N60W), com mergulho para NE. mergulhos secundários podem ser observados para NE-SW, com grande espelhamento e pico em N80E. A inclinação desta trama exhibe comportamento regular. O estereograma mostra que os mergulhos exibem concentrações máximas na ordem de 20° a 50°, com pico máximo entorno de 33° (Figura 5.6a).

Setor II

Este setor está localizado na parte central da área e caracteriza-se por uma orientação bidirecional da foliação segundo a direção NE-SW e NW-SE, com mergulho para NE e NW prioritariamente, no entanto, mergulhos secundários podem ser observados para N, SW e SE. O estereograma mostra que os mergulhos exibem concentrações máximas na ordem de 35° a 65°, com picos máximos 45° e 63°. O estereograma também mostra que o bandamento desenha uma guirlanda indicando que a mesma está inserida no contexto de uma mega dobra (Figura 5.6b).

Setor III

Este setor está localizado na parte centro-leste da área. Caracteriza-se por uma orientação homogênea da foliação na direção NE-SW, com mergulho predominantemente para NNW. Localmente podem ser observadas reorientações da trama planar para NW-SE e E-W. A inclinação desta trama exhibe comportamento regular. Os mergulhos exibem concentrações máximas entre 25° a 70°, com pico máximo entorno de 40° (Figura. 5.6c).

Setor IV

Este setor está localizado na parte leste da área e caracteriza-se por uma orientação relativamente homogênea do bandamento do minério de ferro na direção NE-SW, e mergulho com predominância para SE. Localmente podem ser observadas reorientações da trama planar para NW-SE e E-W. A inclinação desta trama exhibe comportamento regular. O estereograma mostra que os mergulhos exibem concentrações máximas entre 35° a 70°, com pico máximo entorno de 65°. (Figura. 5.6d).

Relação das falhas com os setores estruturais

A (Figura 5.7) mostra o diagrama de rosetas com todas as direções das medidas estruturais dos bandamentos e das falhas. Notar que há grande interferência dos conjuntos de falhas que reorganizou a atitude do bandamento. Essa interferência pode ser observada pela variação das atitudes dos bandamentos na área do platô.

No setor I as falhas que mais contribuíram para a rotação dos bandamentos foram as NE-SE e NW-SE, apesar das falhas N-S estarem fortemente presentes esta influência se deu localmente (Figura 5.7a). A (Figura 5.5b) mostra exemplo bandamentos rotacionados por está estrutura., gerando dobras do tipo *Kink Bands*. No setor II as falhas NS ficaram menos frequente. As falhas EW aparecem com intensidade intermediária, e as falhas NE-SW e NW-SE são as falhas dominantes neste setor (Figura 5.7b). No setor III as falhas NE-SW são as mais proeminentes, seguidas das falhas de direção NW-SE e E-W (Figura 5.7c). No setor IV as falhas NE-SW são as mais proeminentes, seguidas das falhas de direção NW-SE (Figura 5.7d).

Em uma escala maior, essas falhas podem ser reconhecidas em imagens de satélite, radar e Modelos Digitais de Elevação.

As relações de truncamento entre as estruturas são claras. As estruturas N-S, NW-SE e NE-SW truncam e, por vezes, deslocam aqueles de direção E-W; as falhas com padrão NW-SE e cortada pela falha de direção NE-SW; as falhas N-S são aparentemente as mais contínuas, apresentando situações de truncamentos generalizadas com os demais padrões (NE-SW, E-W e NW-SE) (Figura 5.2).

Com base nessa relação espacial pode-se supor que os conjuntos de falhas com padrão E-W são os mais antigos e representam os mais penetrativos da área investigada. Entre os NW-SE e NE-SW a relação mostra que existe uma reciprocidade de

truncamentos e deslocamentos entre ambos. Ao se tentar quantificar essas relações de truncamento, observa-se que os traços de falhas NW-SE cortam e deslocam mais frequentemente os NE-SW, podendo-se inferir que aquele seja aparentemente mais novo que esse; os de padrão N-S possivelmente são os mais novos já que truncam e deslocam todos os outros sistemas (E-W, NE-SW e NW-SE). Foi possível observar que os conjuntos de falhas NE-SW e NW-SE são responsáveis pela formação da maioria das dobras (Figura 5.4).

1

2 Figura 5.6 – Espacialização dos setores estruturais na área do platô S11D.

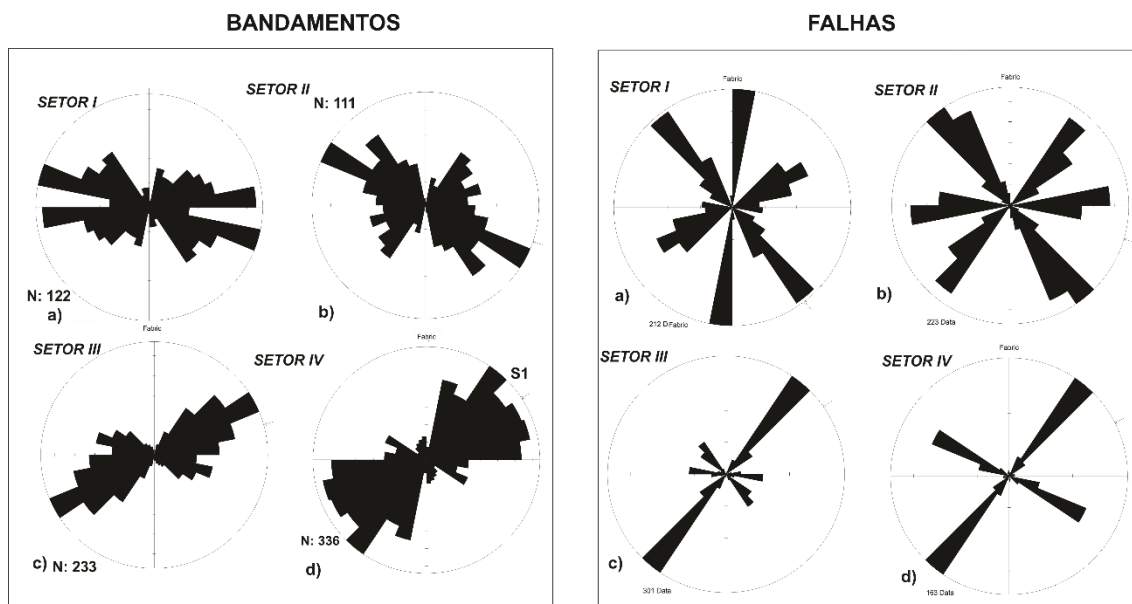


Figura 5.7 – Diagrama de Rosetas para as direções de bandamento e de Lineamentos Rúpteis, observados na área estudada.

5.3 DISCUSSÃO

5.3.1 Temporalidade dos episódios de deformação

A interpretação dos episódios de deformação das Rochas Ferríferas na área do platô S11D é baseada em observações de campo. A separação de episódios de deformação facilita a análise da história dessas rochas. Um episódio, para os fins desta análise, é definido como uma sequência de estruturas observadas em diferentes partes da área de estudo (por exemplo: Bandamento, falhas e dobras). Embora cada episódio de deformação seja provavelmente contínuo no tempo e espacialmente variável, o conceito de episódio permite um tratamento mais simples dos dados estruturais coletados neste estudo.

Existem quatro principais episódios na história geológica de Carajás estruturais dúcteis e rúpteis registrados na área de estudo que são descritos de mais velhos a mais jovens. A faixa de tempo dos episódios que deformaram as rochas ferríferas na área vai de 2.7 Ga até <2.0 Ga. Neste contexto a evolução episódica se deu a partir de deposição da bacia de Carajás por volta de 2.7 Ga (Trendall *et al.* 1998, Pinheiro & Holdsworth 2000a) até a instalação das ZCR no platô S11D. A (Figura 5.8) mostra a sequência esquemática do quadro evolutivo da deformação na área estudada.

5.3.1.1 Deposição da Bacia de Carajás

Ainda não existe um modelo evolutivo e paleogeográfico bem definido para a Bacia de Carajás. Entretanto, (Pinheiro & Holdsworth 1997a) defendem uma evolução com base em

movimento transpressivo sinistral, que teria desenvolvido uma trama milonítica na direção E-W, e afetou o embasamento (Complexo Pium, Complexo Xingú e Suíte Plaquê). Subsequentemente, ocorreriam movimentos transpressivos sinistrais, desenvolvendo zonas de cisalhamento, dobras e metamorfismo no embasamento. E posteriormente, movimentos extensionais, propiciado a formação da Bacia Carajás, na qual foram depositadas as seqüências Vulcano-sedimentares e os sedimentos da Formação Águas Claras (Figura 5.8a).

5.3.1.2 Inversão da Bacia Carajás

Em outro episódio, sob regime de transpressão sinistral, houve a inversão e deformação das seqüências Vulcano-sedimentares desta bacia (Figura 5.8b e c).

5.3.1.3 Instalação da ZCD – NE -SW – D1

Movimentos transpressivos desenvolveram um conjunto de falhas transcorrente sinistrais de direção NE-SW, gerando a primeira geração de dobras de arrasto, intimamente ligadas a movimentação da falha (Figura 5.8c e d). É possível observar, em vários locais, a transposição do bandamento resultado dessa movimentação (Figura 5.5e e f). Essa primeira fase de deformação observada nessas rochas se deu em torno de 2.0 Ga (Pinheiro & Holdsworth 2000a).

5.3.1.4 Instalação da ZCR – NW-SE – D2

A continuidade dessa deformação gerou um novo sistemas de falhas normais de direção NW-SE, gerando a segunda geração de dobras de arrasto, causada pela movimentação normal da falha (Figuras 5.4e, 5.5b, d, g e h). Estas causaram interferência nas dobras e falhas preexistentes criando um padrão de interferência de dobras (Figura 5.8f).

Figura 5.8 – História da deformação das rochas na Serra Sul de Carajás. Modelo gerado no software Visible Geology, compilado com um algoritmo elaborado no Matlab

5.3.2 Indicadores cinemáticos

Para analisar a cinemática e o quadro dos movimentos decorrentes da deformação que as rochas do Grupo Grão-Pará foram submetidas na área, utilizou-se como principal elemento indicador cinemático, as vergências das dobras presentes no minério de ferro.

Essa vergência das dobras indica a direção e o sentido do transporte tectônico durante a deformação. As direções principais e secundárias das vergências presentes nas rochas

ferríferas do platô S11D estão representadas na (Figura 5.9a).

As vergências principais são para os quadrantes NW e SE e as secundárias são para NE e SW. O caráter divergente das vergências tem relação com um modelo de interferência de dobras (Figura 5.9b). Nesse modelo as dobras articuladas exibem planos axiais, e conseqüentemente vergências, com ampla variação quanto à posição espacial.

Os sistemas de falhas de direção NE-SW, de movimentação sinistral e os sistemas de falha normal NW-SE, são os principais responsáveis por estes sistemas de interferência que ocorrem em porções isoladas no platô, na zona de influência do cruzamento desses sistemas de falha.

A Lineação mineral, que em geral é mal preservada, sugere que as falhas NE-SW apresentam movimento que variam desde deslizamento horizontal, até 30 de mergulho caracterizando deslizamento oblíquo. Já os que vêm do conjunto de falhas NW-SE sugerem que o movimento de deslizamento variou desde o sentido do mergulho até um ângulo oblíquo, em seção geológica as estruturas NE-SW, apresentaram geometria com sentido movimentação direcional e as estruturas de direção NW-SE apresentaram geometria de movimentação normal a oblíqua.

Os eixos de dobra são tipicamente periclinais mostrando variações ao longo do platô (Figura 5.9a). As dobras individuais geralmente se afastam ou se ramificam ao longo do mergulho, definindo um padrão irregular dobras tipo box folds e as geometrias policlinal são comuns, conforme ilustrado pela distribuição em múltiplos setores estruturais da distribuição das concentrações dos polos (Figura 5.6). Nas áreas marginais entre as rochas dobradas e as zonas de rochas não deformadas, muitas vezes existem zonas locais de maior tensão (até 100 metros de largura) em que as dobras tornam-se apertadas a isoclinal (Figura 5.3a e b, 5.5e e f). Assim, as intensidades de deformação associadas a este conjunto dominante de dobras são muito variáveis e sugerimos que os padrões de interferência de dobras B1 e B2 de Ladeira & Cordeiro (1988) pertencem a esse grupo de dobras (Figura 5.9).

Figura 5.9 – Geometria dos conjuntos de dobras centimétricas a métricas no platô S11D; a) Estereograma mostrando ao longo do platô a distribuição dos eixos das dobras e a distribuição dos planos axiais das mesmas onde é possível observar a faixa de distribuição dos planos ao qual são reconhecidos dois domínios; b) modelo de interferência de dobras, causado pela superposição de dois sistemas de dobras como resultado da atuação de dois sistemas de falhas, c) Afloramento na área de trabalho, na margem da lagoa do violão mostrando padrão de interferência de dobras

5.3.3 Implicações Gerais para a História geológica de Carajás

O platô S11D tem sua configuração geométrica fortemente controlada pelas falhas transcorrentes de direção NE-SW de caráter sinistral e falhas normais de direção NW-SE. Os elementos geométricos das dobras indicam forte relação com esses sistemas de falhas. A partir dessa geometria pode-se afirmar que a região do platô S11D pode ser interpretada como uma zona soerguida durante o evento de transpressão sinistral associada à reativação da Falha Carajás, consecutivamente dobrada durante transpressão NE-SW sobre as rochas cristalinas do embasamento, rotacionando todo o bloco da serra sul no sentido anti-horário. Os conjuntos de falhas, identificadas neste trabalho, podem ser identificadas regionalmente (Figura 5.10).

Figura 5.10 – Desenho esquemático mostrando a relação entre as principais estruturas na região do platô S11D e a estruturação geral da Bacia Carajás

Segundo informações de Pinheiro & Holdsworth (2000b), esse evento deformacional de inversão tectônica ocorreu em torno de 2.0 Ga. A deformação das rochas da Formação Carajás, no platô S11D está vinculada a esse episódio tectônico.

5.4 CONCLUSÕES

A combinação dos elementos da trama tectônica nas rochas ferríferas subsidiou as seguintes conclusões.

Os principais trends estruturais das rochas ferríferas são por ordem de ocorrência:

1 – Falhas transcorrentes destrais NE-SE, de caráter Dúctil- Rúptil. Essas falhas controlaram a formação das dobras de arrasto com eixo com caimento para NE.

2 - Falhas transcorrentes destrais E-W de Caráter dúctil.

3 - Falhas Normais NW-SE de caráter rúptil. Essas falhas controlaram a formação das dobras de arrasto com eixo com caimento para SW.

4 Falhas N-S de caráter rúptil controlaram a formação das dobras forçadas do tipo Kink Bands em partes isoladas na área.

Sobre a deformação das rochas ferríferas

1 – A deformação das rochas ferríferas se deu entre 2.0 a 1.9 durante a transpressão sinistral que deu origem a falha Carajás, o que corrobora informações já publicadas de diversos autores sobre as rochas ferríferas em outras partes da Serra dos Carajás.

2 – A deformação se deu de forma homogênea na área. Não sendo possível dividi-la em domínios de deformação, mas em setores onde a deformação gerou estruturas com orientação espacial divergente.

3 – A geometria dos corpos rochosos ferríferos deformados é controlada por dois sistemas de falhas principais, um de caráter dúctil de direção NE-SW e outro de caráter Rúptil de direção NW-SE. E dois sistemas de falhas secundários de direção E- W e N-S.

4 – Essas estruturas são observáveis independente de escala. Desde a escala micro a macro.

CAPITULO 6 - ANÁLISE COMPARATIVA DE MAPAS ESTRUTURAIS GERADOS A PARTIR DE LiDAR AEROTRANSPORTADO E MÉTODOS MANUAIS TRADICIONAIS: ESTUDO DE CASO NA MINA DE FERRO DO S11D, CARAJÁS, AMAZÔNIA

6.1 INTRODUÇÃO

Os mapas geológicos contêm informações de feições estruturais e de tipologia de rochas, e são utilizados na mineração, construção civil, prospecção de água subterrânea e explorações diversas entre outras aplicações. Os dados estruturais que representam descontinuidades como superfícies de acamamento, faces de juntas e planos de falha são parâmetros de entrada particularmente importantes nos sistemas de classificação de maciços rochosos, permitindo que se tomem decisões baseadas nesses parâmetros para diversas aplicações. Os dados necessários para produzir esses mapas são comumente coletados utilizando-se somente métodos manuais baseados em dados de campo, que muitas vezes podem ser imprecisos, sujeitos a erros de amostragem, dificuldade de acesso e falta de exposições de bons afloramentos.

Para esta análise serão utilizados dois mapas de lineamentos estruturais produzidos nesta tese. O primeiro é resultante do processamento das imagens LiDAR, e o segundo mapa resultante de métodos manuais baseados em dados de campo com coleta de atitudes de feições planares e lineares dos bandamentos do minério de ferro em campo.

A área de trabalho está localizada na Serra dos Carajás, projeto S11D sul da Serra dos Carajás (Figura 1.1).

6.2 METODOLOGIA

Para a análise comparativa os mapas de contorno estrutural gerados nos dois conjuntos de dados foram especializada do software SPRING 5.2 (Câmara *et al.* 1996), utilizando-se o modulo análise de lineamentos, do referido software, onde foram gerados os parâmetros estatísticos. Os dados foram exportados ao Excel onde foram tratados os parâmetros estatísticos e definidos o coeficiente de correlação dos lineamentos para cada mapa avaliado. O objetivo desta análise foi calcular e quantificar a dispersão das linhas de contorno estrutural em cada mapa. Os detalhes dos métodos utilizados para a geração dos mapas de contorno estrutural aqui utilizado, estão descritos nos Capítulos 4 e 5 desta tese.

6.2.1 Mapa de contorno estrutural baseado em lidar

O mapa gerado a partir do processamento a partir de dados LIDAR de alta resolução (1m), ao qual foi aplicada técnica de realce visando realçar as sutis feições estruturais na área de trabalho. A técnica de realce aplicada foi a Filtragem Laplaciana em Modelo de Relevô sombreado em visadas multidirecionais. Posteriormente foi realizada a substituição da paleta de cores em tons de cinza pela paleta *Spectrum Full Brighth*. No mapa resultante foram observados os seguintes trends estruturais, NE-SW, NW-SE e secundariamente N-S e E-W. Os detalhes do processamento e das considerações acerca do significado geológico destes trends estruturais podem ser visualizados no capítulo 4 desta tese.

6.2.2 Mapa de contorno estrutural baseado em campo

A construção do mapa de contorno estrutural baseado em dados de campo foi realizada, a partir da plotagem dos dados estruturais de campo em mapa, no total de 802 medidas de bandamentos para a área do S11D, e posterior geração de mapa na escala de 1:5.000. A interpretação desses dados estruturais foi realizada visualmente a partir da interpolação das atitudes das camadas, gerando um mapa de curvas de contorno estrutural. A linha de contorno estrutural obtida tem uma conotação semelhante à curva de nível para caracterização da topografia. No caso da strike line, porém, ela se refere a um horizonte estratigráfico ou estrutural específico (Lisle 1996, Bennison *et al.* 2013). As informações detalhadas deste mapa podem ser vistas no capítulo 5 desta tese.

6.2.3 Análise estatística de lineamentos

Cada tipo de lineamento é caracterizado por seu azimute e seu comprimento. Do ponto de vista estritamente cinemático o azimute é a propriedade que caracteriza a orientação dos esforços. Todavia, o comprimento é uma medida da intensidade dos processos. Assim sendo, é importante que qualquer tratamento estatístico leve em conta ambas propriedades (Sartorato 1998).

Do ponto de vista matemático, um lineamento é um eixo, que, diferentemente de um vetor, não possui sentido (Mardia 1972). Assim sendo, ele não necessita de todo o intervalo angular (0-360) para ser caracterizado. Por esse motivo usa-se apenas o intervalo 0-180°, com os azimutes medidos no sentido horário a partir do norte. O pacote Análise de lineamento do software SPRING utiliza esse método (Câmara *et al.* 1996).

Os dados vetoriais, ao ultrapassarem os limites de 180° ou 360°, retomam ao início da escala de medidas. Este é o principal motivo pelo qual a estatística escalar (convencional) não

pode ser usada para dados vetoriais (Sartorato 1998).

Os principais parâmetros estatísticos extraídos foram:

- Média Azimute Simples
- Desvio Padrão Azimute Simples
- Média Azimutal ponderada
- Desvio Padrão Média Azimutal Ponderada

Como os azimutes são medidos no intervalo 0-180°, eles necessitam ser dobrados para recuperação da circularidade. Após os cálculos, os parâmetros angulares deverão ser divididos por dois para retomar aquele intervalo. Por exemplo, um conjunto de linhas com azimutes 0°, 5°, 10°, 170°, 175° e 180°, apresentara azimute médio 90° se os ângulos não forem dobrados, o que estará errado pois, intuitivamente, a resultante estará em torno de 0°. Dobrando-se os ângulos obteremos o azimute correto (Sartorato 1998).

Como já foi mencionado, o comprimento dos lineamentos é igualmente importante, motivo pelo qual utiliza-se a equação para o cálculo dos parâmetros ponderados. Os parâmetros simples são calculados assumindo-se comprimentos unitários para as linhas. Assim, se todas as linhas tiverem o mesmo azimute, a resultante será igual a n, o número de pontos e a razão de consistência igual a um. Deste modo, a resultante, a razão de consistência e o desvio padrão, são medidas da dispersão em torno do azimute médio. Obviamente, nas medidas ponderadas pelo comprimento, linhas maiores terão importância maior (Sartorato 1998).

6.2.4 Comparação entre os dados estatísticos dos mapas avaliados

Para a análise comparativa foram analisados os dois mapas em conjunto. Foi gerado o diagrama de rosetas da frequência e da orientação média desses lineamentos (Figura 3). Por fim, foram gerados os parâmetros estatísticos para cada mapa, posteriormente foi gerado o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre todos os parâmetros estatísticos dos lineamentos dos mapas para cada método estudado. Se dois mapas de densidade de lineamentos, com abundâncias, consideravelmente diferentes, exibem uma forte correlação, então eles podem, essencialmente, ser considerados equivalentes, enquanto uma fraca correlação sugere que os dois mapas contêm informações diferentes (Parsons & Yearley 1986).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Estatística dos mapas estudados

Tanto o mapa de contorno estrutural gerado a partir de medidas de campo quanto o

baseado em LIDAR apresentam disposição espacial dos bandamentos do minério de ferro em diversas direções que refletem a influência dos falhamentos, que causaram a rotação nos bandamentos do minério de ferro. Em ambos os mapas foram observadas as seguintes orientações nos trends N-S, E-W, NE-SW e NW-SE. A análise estatística mostra essas variações.

6.3.2 Parâmetros estatísticos

Foram analisados os seguintes parâmetros dos mapas de contorno estrutural:

- Média Azimute Simples.
- Desvio Padrão Azimute Simples
- Média Azimutal Ponderada
- Desvio Padrão Média Azimutal Ponderada

A Tabela 6.1 sumariza os resultados das análises estatísticas realizadas na área. Como mencionado acima, tanto o mapa de contorno estrutural elaborado a partir de dados de campo como o baseado nos dados LIDAR, apresentaram quatro conjuntos principais de direção de contorno estrutural.

Tabela 6.1 – Parâmetros estatísticos dos mapas de contorno estrutural elaborado a partir de metodologia distintas

Intervalos de Azimute		Média Azimutal Simples (a)	Média Azimutal Simples (b)	Desvio Padrão Média Azimute Simples (a)	Desvio Padrão Média Azimute Simples (b)	Média Azimutal ponderada(a)	Média Azimutal ponderada (b)	Desvio Padrão Média Azimutal ponderada (a)	Desvio Padrão Média Azimutal ponderada (b)
0	10	5,04	2,36	2,7	1,6	5,34	3,73	2,71	2,11
10	20	15,22	16,9	2,87	3,69	15,59	19,18	2,89	4,46
20	30	25,21	26,52	2,87	2,24	23,84	28,56	3,18	3,03
30	40	35,47	35,53	2,88	2,74	30,01	30,96	6,18	5,33
40	50	45,32	44,12	2,88	2,81	49,02	40,54	4,69	4,55
50	60	55,05	53,82	2,88	3,07	51,85	51,5	4,31	3,85
60	70	64,9	64,07	2,91	2,8	61,15	61,11	4,75	4,1
70	80	74,74	73,11	2,87	2,91	78,98	71,2	5,12	3,54
80	90	84,87	85,71	2,88	3,42	81,05	87,53	4,79	3,9
90	100	94,77	93,91	2,86	3,45	91,74	91,68	4,18	4,18
100	110	105,18	105,54	2,89	2,54	109,06	105,11	4,84	2,58
110	120	114,48	116,57	2,94	2,63	113,4	118,79	3,13	3,45
120	130	124,18	125,19	2,78	2,75	121,33	120,96	3,99	5,05
130	140	135,36	134,07	2,96	2,78	134,56	131,63	3,07	3,7
140	150	144,16	143,63	2,81	2,84	141,66	140,42	3,76	4,32
150	160	154,8	155,73	3,15	3,26	159,23	153,43	5,43	4,2

		3							
160	170	164,3 9	167,03	3,01	0,7	160,32	166,53	5,1	0,99
170	180	176,2 5	178,68	2,89	1,37	179,95	179,26	4,72	1,35

a) – Estatística do mapa de contorno estrutural baseado em dados de campo

b) – Estatística do mapa de contorno estrutural baseado em dados LIDAR.

6.3.3 Coeficientes de correlação entre os mapas avaliados

Foram correlacionados os valores de Média Azimutal simples e Média Azimutal Ponderada em intervalos de dez graus conforme dados da Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Coeficientes de Correlação de Pearce dos mapas avaliados

Média Azimutal Simples			
		<i>Modelo Relevo Sombreado</i>	<i>Modelo Laplaciano</i>
<i>Modelo Relevo Sombreado</i>		1	
<i>Modelo Laplaciano</i>		0,919967473	1
Média Azimutal Ponderada			
		<i>Modelo Relevo Sombreado</i>	<i>Modelo Laplaciano</i>
<i>Modelo Relevo Sombreado</i>		1	
<i>Modelo Laplaciano</i>		0,936552296	1

O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento ou o (r) de Pearson, aqui utilizado, mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional com valores situados ente -1,0 e 1.0 inclusive, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Este coeficiente, normalmente representado pela letra "r" assume apenas valores entre -1 e 1. $r=1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis. $r=-1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui. $r=0$ Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma outra dependência que seja "não linear". Assim, o resultado $r=0$ deve ser investigado por outros meios (Martinez & Ferreira 2007). O coeficiente de correlação entre os mapas retornou um alto valor positivo, $r > 0,9$ (Tabela 6.2). O que demonstra alta correlação entre os mapas analisados.

6.3.4 Desvio padrão

A principal razão de consistência na análise de lineamentos é o desvio padrão, são medidas da dispersão em torno do azimute médio (Wladis 1999). Obviamente, nas medidas ponderadas pelo comprimento, linhas maiores terão importância maior. aqui são apresentados

os dados comparativos dos desvios padrão das médias azimutais simples e ponderadas respectivamente (Figuras 6.1 e 6.2). As

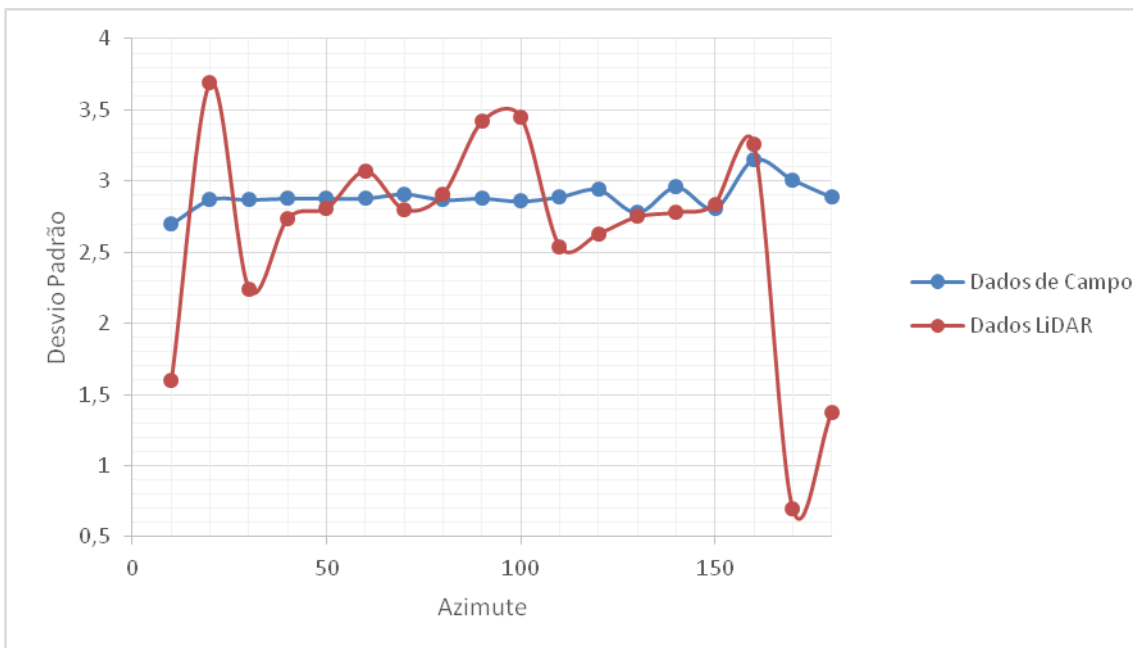


Figura 6.1 - Desvio Padrão Média Azimutal Simples

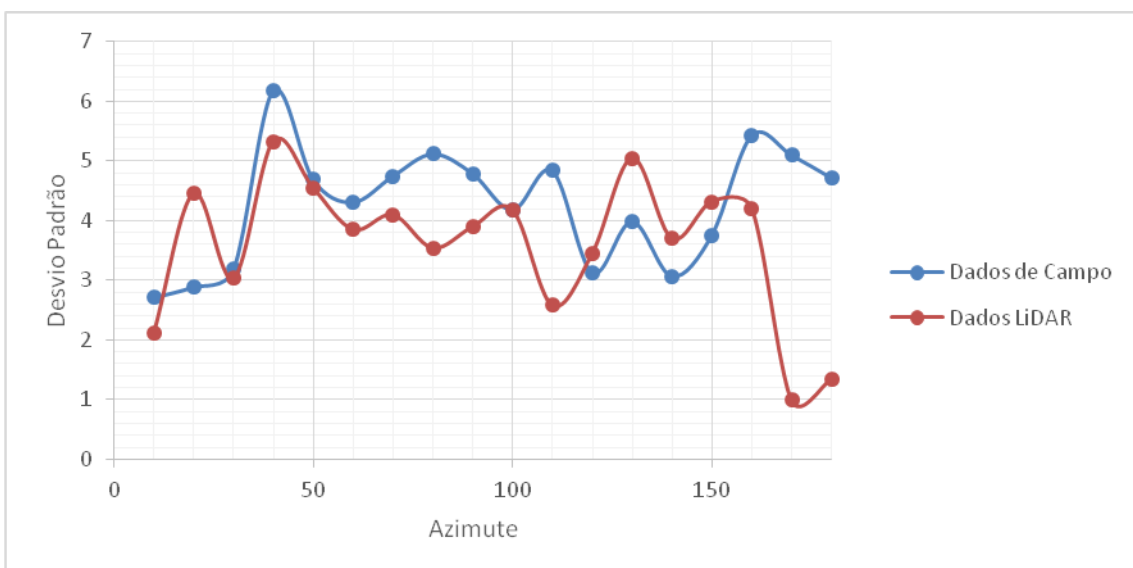


Figura 6.2 - Desvio Padrão Média Azimutal Ponderada

Os resultados mostram que o Desvio padrão dos mapas analisados apresentam diferenças e semelhanças.

O Desvio padrão das médias azimutais simples foi o que apresentou maior diferença, enquanto os dados de campo apresentaram Desvio Padrão Médio de 2,7 a 3,1, com uma faixa de variação de 0,4. Os dados de Desvio Padrão lidar apresentaram um espectro de variação um pouco maior de 0,7 a 3,7, com uma faixa de variação de 3,0, o gráfico da Figura 6.1 apresenta essas diferenças, mostrando as discrepâncias entre os dados dos Desvios Padrão

apresentados.

O desvio Padrão das Médias Azimutais Ponderadas apresentou dados com maior faixa de similaridades. As faixas azimutais de 30 a 150 az foram as que apresentaram maior concordância e faixas de variação de Desvio Padrão coincidentes. As faixas de 0 a 30 az e de 150 a 180 foram as que apresentaram as maiores discrepâncias.

Essas diferenças estão associadas principalmente pelo fato da Média Azimutal Simples não levar em conta os dados de comprimentos dos lineamentos de contorno estrutural e somente a frequência de ocorrência, diferente da média ponderada que utiliza o comprimento associado a frequência.

6.3.5 Diagrama de rosetas

Os diagramas de rosetas construídos para os referidos mapas também demonstram que existe grande similaridade entre os mesmos, pois mostraram que os principais trends estruturais apresentam frequências relativas próximas o que foi confirmado na análise do coeficiente de correlação de Pearson (Figura 6.3).

O diagrama relacionado do mapa construído a partir das medidas de campo apresentou maior dispersão do que o produzido a partir dos dados LiDAR. Isso deu em decorrência de vários fatores, entre eles podemos citar:

1 – A área é composta de minério de ferro e apresenta alto índice de magnetismo, o que pode comprometer as medidas de campo.

2 – Interpolação de medidas de camadas diferentes, o que pode inserir no mapa um falso arqueamento da estrutura. Devido a quantidade de medidas disponíveis para a geração do mapa de contorno estrutural baseado em campo algumas generalizações tiveram que ser feitas, como a tentativa de gerar uma linha de contorno estrutural a grandes distancias, o que pode inserir incertezas no mapa, gerando estruturas muito curvas, quando na realidade trata-se de outro horizonte estrutural.

a) b)
Figura 6.3 – Diagrama de rosetas dos mapas analisados, em a) Diagrama de Rosetas da frequência dos lineamentos do mapa de contorno estrutural baseado em dados de Campo, b) Diagrama de Rosetas da frequência dos lineamentos do mapa de contorno estrutural baseado em dados LIDAR

6.4 CONCLUSÃO

Sobre a comparação entre os dois métodos de mapeamento podemos concluir que:

1 – O coeficiente de correlação de Pearson mostrou a alta similaridade entre os mapas analisados.

2 – Os mapas analisados apresentam grande similaridade com relação a direção dos trends principais, demonstrados pelas similaridades em seus diagramas de rosetas.

3 – A análise dos gráficos de Desvio Padrão mostrou que os dados de contorno estrutural baseados em Médias Azimutais Ponderadas, apresentaram maiores similaridades entre os dois mapas que as Médias Azimutais simples. Isso se deu pelo fato da Média Azimutal Ponderada levar em consideração o comprimento dos lineamentos de contorno estrutural.

4 – A análise demonstrou o MDT LiDAR poderá ser utilizado como ferramenta auxiliar no mapeamento estrutural geológico e que é uma excelente fonte de informações estruturais mesmo na fase anterior a realização de trabalhos de campo.

CAPITULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção apresenta um resumo das principais considerações e conclusões dos capítulos 4, 5 e 6. Estes dizem respeito: a utilidade dos dados LiDAR, na geração de informações estruturais; o caráter geológico e estrutural e a história da região platô S11D e, finalmente, comparação entre os dois métodos de mapeamentos.

7.1 USO DO LiDAR NO MAPEAMENTO ESTRUTURAL NA ÁREA DO PLATÔ S11D

Os resultados deste estudo demonstraram o potencial significativo para produzir mapas estruturais detalhados e abrangentes de forma eficiente, usando dados LiDAR aerotransportados na complementação do mapeamento geológico-estrutural. Embora os resultados deste estudo tenham relevância direta para o mapeamento estrutural das FFB na área do corpo de minério S11D, observa-se que os dados LiDAR aerotransportados de alta resolução possam ser utilizados para melhorar o mapeamento estrutural detalhado em outras áreas na Serra dos Carajás, visto que existe disponibilidade de informações de cobertura de dados LIDAR aerotransportados para quase a totalidade da Serra dos Carajás.

Com a capacidade de adquirir dados topográficos de alta resolução em terrenos densamente florestados, o LiDAR aerotransportado tem o potencial de ser uma ferramenta valiosa para muitos aspectos do mapeamento estrutural em qualquer configuração geológica, independentemente da cobertura vegetal. No entanto, em cada caso, a eficácia do dado LiDAR dependerá da geração de um MDT adequado. Em terrenos densamente florestados, isso pode exigir uma alta densidade de pontos LiDAR, ou um aumento da faixa de sobreposição das linhas de voos, visando aumentar o número de retornos do solo. Embora, o mapeamento estrutural detalhado, utilizando uma abordagem manual traga maior confiabilidade, requer maior tempo de interpretação. Entretanto, esta ainda é a alternativa mais confiável, até que novos algoritmos computacionais automatizados de extração de lineamentos tornem-se mais eficientes para mapear feições estruturais crustais, e não antropogênicas.

7.2 PADRÃO DE DEFORMAÇÃO E A HISTÓRIA DA REGIÃO PLATÔ S11D

A combinação dos elementos da trama tectônica nas rochas ferríferas subsidiou as seguintes conclusões.

Os principais trends estruturais das rochas ferríferas são por ordem de ocorrência:

1 – Falhas transcorrentes destrais NE-SE, de caráter Dúctil- Rúptil. Essas falhas

controlaram a formação das dobras de arrasto com eixo com caimento para NE.

2 - Falhas transcorrentes destrais E-W de Caráter dúctil.

3 - Falhas Normais NW-SE de caráter rúptil. Essas falhas controlaram a formação das dobras de arrasto com eixo com caimento para SW.

4 Falhas N-S de caráter rúptil controlaram a formação das dobras forçadas do tipo Kink Bands em partes isoladas na área.

Sobre a deformação das rochas ferríferas

1 – A deformação das rochas ferríferas se deu entre 2.0 a 1.9 durante a transpressão sinistral que deu origem a falha Carajás, o que corrobora informações já publicadas de diversos autores sobre as rochas ferríferas em outras partes da Serra dos Carajás.

2 – A deformação se deu de forma homogênea na área. Não sendo possível dividi-la em domínios de deformação, mas em setores onde a deformação gerou estruturas com orientação espacial divergente.

3 – A geometria dos corpos rochosos ferríferos deformados é controlada por dois sistemas de falhas principais, um de caráter dúctil de direção NE-SW e outro de caráter Rúptil de direção NW-SE. E dois sistemas de falhas secundários de direção E- W e N-S.

4 – Essas estruturas são observáveis independente de escala. Desde a escala micro a macro.

7.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS DE MAPEAMENTOS

Sobre a comparação entre os dois métodos de mapeamento podemos concluir que:

1 – O coeficiente de correlação de Pearson mostrou a alta similaridade entre os mapas analisados.

2 – Os mapas analisados apresentam grande similaridade com relação a direção dos trends principais, demonstrados pelas similaridades em seus diagramas de rosetas.

3 – A análise dos gráficos de Desvio Padrão mostrou que os dados de contorno estrutural baseados em Médias Azimutais Ponderadas, apresentaram maiores similaridades entre os dois mapas que as Médias Azimutais simples. Isso se deu pelo fato da Média Azimutal Ponderada levar em consideração o comprimento dos lineamentos de contorno estrutural.

4 – A análise demonstrou o MDT LiDAR poderá ser utilizado como ferramenta auxiliar no mapeamento estrutural geológico e que é uma excelente fonte de informações estruturais mesmo na fase anterior a realização de trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS

Abreu S.S., Macambira J.B, Cabral E.S. 2016. Geologia e petrografia de formações ferríferas com ênfase na gênese de cavidades em Serra Norte, Carajás-Pa. *Espeleo-Tema*, **27**(1): 33–44.

Abshire J.B., Sun X., Riris H., Sirota J.M., McGarry J.F., Palm S., Yi D., Liiva P. 2005. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: on orbit measurement performance. *Geophys Res Lett.*, Wiley Online Library, **32**.

Ali S.A. & Pirasteh S. 2004. Geological applications of Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) data and Geographic Information System (GIS): Mapping and structural interpretation in south-west Iran, Zagros Structural Belt. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **25**:4715–4727.

Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology, geochemistry and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás province, Brazil. *Precambrian Res.*, **187**:201–221.

Althoff F., Barbey P., Boullier A-M. 2000. 2.8–3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Res.*, Elsevier, **104**:187–206.

Andersen H-E., McGaughey R.J., Reutebuch S.E., Carson W.W., Schreuder G. 2004. Estimating forest crown fuel variables using LIDAR data. *In: ASPRS Annu Conf., Denver. Proceeding.* 23-27, May.

Araújo O.J.B. , Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás, folha SB. 22-ZA*. Belém, CPRM.

Araújo O.J.B., Maia R.G.N., João X.S.J., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. *In: 7º Congr Latino-Americano Geol., Belem. Anais...* p. 324–338.

Argialas D.P. & Mavrantza O.D. 2004. Comparison of edge detection and hough transform techniques for the extraction of geologic feature. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.*, **34**, (Part XXX 2):34.

Auler A., Piló L., Parker C., Senko J., Sasowsky I., Barton H. 2014. Hypogene cave patterns in iron ore caves: Convergence of forms or processes? *Hypogene Cave Morphol.*, Karst Water Institute.

Baltsavias E.P. 1999. Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.*

Barley M.E., Pickard A.L., Hagemann S.G., Folkert S.L. 1999. Hydrothermal origin for the 2

billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Miner Depos.*, **34**:784–789.

Barnes J.W. & Lisle R.J. 2013. Basic Geological Mapping. John Wiley & Sons;

Barros C.E.M., Dall'Agnol R., Vieira E.A.P., Magalhães M.S. 1995. Granito Central da Serra dos Carajás: avaliação do potencial metalogenético para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. *Bol do Mus Para Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, **7**:93–123.

Barros C.E.M., Macambira M.J.B., Barbey P., Scheller T. 2004. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, província Mineral de carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. *Rev Bras Geociências*, **34**:531–538.

Barrote V.R., Rosiere C.A., Rolim V.K., Santos J.O.S., Mcnaughton N.J. 2017. As formações ferríferas bandadas proterozoicas de Guanhões, borda sudeste do Cráton São Francisco, Brasil: evidências de contaminação detrítica. *Geol USP, Série Científica*, **17**:303–324.

Barth N.C. 2014. Lidar reveals uniform Alpine fault offsets and bimodal plate boundary rupture behavior, New Zealand: Comment. *Geology*, **42**:349.

Barth N.C., Toy V.G., Langridge R.M, Norris R.J. 2012. Scale dependence of oblique plate-boundary partitioning: New insights from LiDAR, central Alpine fault, New Zealand. *Lithosphere*, **4**:435–448.

Behan A., Maas H.G., Vosselman G. 2000. Steps towards quality improvement of airborne laser scanner data. *In: 26th Annu Conf Remote Sens. Proceeding...* p. 12–14.

Beisiegel V.R. 1982. Distrito ferrífero da Serra dos Carajás. *In: 1º Simp. Geol. Amaz.* p. 25–46.

Beisiegel V.R., Bernardelli A.L., Drummond N.F., Ruff A.W., Tremaine J.W. 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Brazilian J Geol.*, **3**:215–242.

Bennison G.M., Olver P.A., Moseley K.A. 2013. *An introduction to geological structures and maps*. Routledge.

Borges N.R.A., Viveiros J.F.M., Guimarães I.G. 1979. Contribuição à geologia da região de Guanhões. *In: 1º Simp. Geol. Minas Gerais. Atas...* p. 101–123.

Cabral E.S., Macambira J.B., Abreu S.S. 2016. Geologia e petrografia de formações ferríferas bandadas em cavernas da Serra Sul, Carajás - Pa. *Espelo-Tema*, **27**:45–56.

Câmara G., Souza R.C.M., Freitas U.M., Garrido J. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Comput Graph.*, Elsevier, **20**:395–403.

Carneiro M.C.S.M. 2011. *Monitoramento das dunas utilizando o sistema de mapeamento a*

laser (lidar) aerotransportável: um estudo do campo de dunas do município de Rio do Fogo, RN, Brasil. Universidade Federal de Pernambuco.

Carvalho T.A. 2017. *Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do granito Gradaús, Província Carajás, SE do Pará.* Universidade Federal do Pará, Belém.

Cawood A.J., Bond C.E., Howell J.A., Butler R.W.H., Totake Y. 2017. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. *J. Struct. Geol.*, Elsevier, **98**:67–82.

Chamberlin R.T. 1910. The appalachian folds of central Pennsylvania. *J Geol.*, University of Chicago Press, **18**:228–251.

Chamberlin R.T. 1919. The building of the Colorado Rockies. *J Geol.*, University Press of Chicago, **27**:225–251.

Cockett R. 2018. *Visible geology.* Disponível em: <<http://app.visiblegeology.com/>>. Acesso em: 13 fev.

Collinson J.D. & Thompson D.B. 1988 *In*: Woodcock N.H. 1989. *Sedimentary Structures.* 2nd ed. x + 207 pp. London, Unwin Hyman. Geol Mag. 2009/05/01. Cambridge University Press; 1989;126:448.

Congalton R.G. & Green K. (org.). 2008. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices.* 2^a ed. CRC press.

Cope I.L., Wilkinson J.J., Boyce A.J., Chapman J.B., Herrington R.J., Harris C.J. 2008. *Genesis of the pic de fon iron oxide deposit, Simandou Range, Republic of Guinea, West Africa. banded iron form high-grade iron ore.* Littleton, Society of Economic Geology, p. 339–360.

Corgne S., Magagi R., Yergeau M., Sylla D. 2010. An integrated approach to hydro-geological lineament mapping of a semi-arid region of West Africa using Radarsat-1 and GIS. **114**:1863–1875.

Costa J.B.S., Araújo O.J.B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. A província mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Bol do Mus Para Emílio Goeldi.*, **7**:199–235.

Costa J.B.S. & Hasui Y. 1991. *Zonas e cirurões de cisalhamento.* Belém.

Crombaghs M., Brügelmann R., de Min E.J. 2000. On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data. *Int Arch Photogramm Remote Sens.*, **33**:230–237.

Cunningham D., Grebby S., Tansey K., Gosar A., Kastelic V. 2006a. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps,

Slovenia. *Geophys Res Lett.*, **33**:1–5.

Cunningham D., Grebby S., Tansey K., Gosar A., Kastelic V. 2006b. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia. *Geophys Res Lett.*, **33**:L20308.

Dall'Agnol R., Lafon J-M., Macambira M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, amazonian araton: Geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineral Petrol.*, Springer, **50**:113–138.

Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Lamarão C.N. 2013. Magmatismo granitoide arqueano e evolução geológica do Subdomínio de Transição da Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico, Brasil Archean granitoid magmatism and geologic evolution of the Transition Subdomain of the Carajás Province, southeastern A. *Bol Mus Para Emílio Goeldi, Sér. Ciênc. Nat.*, **3**:6.

Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian Craton. *In: Symp. Magmat. Crustal Evol. Metallog. Amaz. Craton, Belém. Abstract...* p. 99–150.

Dall'Agnol R., Souza Z.S., Althoff F.J., Barros C.E.M., Leite A.A.S., Jorge João X.S. 1997. *General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province*. Salvador, CBPM, ISGAM, v. 2, p. 135–142.

Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Rämö O.T., Moura C.A.V., Macambira M.J.B., de Oliveira D.C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos*, Elsevier, **80**:101–129.

Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. Província Mineral de Carajás–litoestratigrafia e principais depósitos minerais *In: 35º Congr. Bras. Geol. Anexo.* p. 11–56.

Domingos F.H.G. 2003. *Geometria, cinemática e história tectônica das rochas da Serra Norte, Carajás-Pa*. Universidade Federal do Pará, Belém.

Dorr J.V.N. 1969. *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington, D.C.

Dyess J. & Hansen V.L. 2014. Application of Lidar to resolving tectonic and glacial fabrics in glaciated terrain: An example from an Archean granite-greenstone belt, Northeastern Minnesota. *Geosphere*, **10**:987–997.

Feio G.R.L. 2011. *Magmatismo granitoide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás*. PhD thesis, Instituto de

Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J., Soares J.E.B. 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Res.*, **227**.

Fitton N.C. & Cox S.J.D. 1998. Optimising the application of the Hough transform for automatic feature extraction from geoscientific images. *Comput Geosci.*, **24**:933–951.

Fowler A., France J.I., Truong M. 2011. *Applications of advanced laser scanning technology in geology. Riegl USA*. Disponível em: <<http://www.rieglusa.com/pdf/applications-ofadvanced-laser-scanning-technology-in-geology-ananda-fowler-final.pdf>>. Acesso em: 10 jan.

Fowler R. 2001. *Topographic lidar. Digit Elev Model Technol Appl DEM users Man.* Bethesda, Maryland, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p. 207–236.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geocronológica de ortopiroxênio-trondhjemitos (leucoenderbitos) da região de Vila Cedere III, Canaã dos Carajás-PA, Província Mineral de Carajás. *In: SBG, Congr. Bras. Geol.*

Galarza M.A. & Macambira M.J.B. 2002. Geocronologia e evolução crustal da área do depósito de Cu-Au Gameleira, Província Mineral de Carajás (Pará), Brasil. *Geol USP, Série Científica*, **2**:143–159.

Gallay M. 2013. Direct acquisition of data: airborne laser scanning. *Geomorphol Tech.*, **4**:16.

Gibbs A.K. & Wirth K.R. 1990. Geologic setting of the Serra dos Carajás iron deposits, Brazil. Anc banded iron form regional present Athens. *Theophrastus*, 83–102.

Gibbs A.K., Wirth K.R., Hirata K.H., Olszewski J. 1986. Age and composition of the Grao Para Group volcanics, Serra dos Carajás, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **16**:201–211.

Giglierano J. 2007. *Lidar Basics for Mapping Applications*. US Geol. Surv. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2007/1285/pdf/Giglierano.pdf>>. Acesso em: 02 fev. (Open-File Rep. 1285).

Giongo M., Koehler H.S., Machado S.A., Kirchner F.F., Marchetti M. 2010. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesq. Florest. Bras.*, **30**:231–244.

Grebby S., Cunningham D., Naden J., Tansey K. 2012. Application of airborne LiDAR data and airborne multispectral imagery to structural mapping of the upper section of the Troodos

ophiolite, Cyprus. *Int J Earth Sci.*, **101**:1645–1660.

Grebby S., Naden J., Cunningham D., Tansey K. 2011. Integrating airborne multispectral imagery and airborne LiDAR data for enhanced lithological mapping in vegetated terrain. *Remote Sens Environ.*, Elsevier Inc., **115**:214–226.

Grohmann C. & Miliareisis G. 2013. Geological applications of digital terrain analysis. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, Taylor & Francis, **27**:1403–1404.

Grohmann C.H., Campanha G.A.C, Soares Junior A.V. 2011. Openstereo: um programa livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. *In: 13º Simp. Nac. Est. Tectônicos & 8º Int. Symp. Tectonics, Campinas.* p. 26–28.

Grohmann C.H., Riccomini C., Alves F.M. 2007. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Comput Geosci.*, Elsevier, **33**:10–19.

Harding D.J. 2000. *Principles of airborne laser altimeter terrain mapping*. NASA (National Aeronaut Sp Adm Goddard Sp Flight Cent.

Heidemann H.K. 2012. *Lidar base specification*. US Geological Survey.

Hickman A.H. 2001. The West Pilbara granite–greenstone terrane, and its place in the Pilbara Craton. *In: 4th Int. Archaean Symp.*, Sidney, Australia. p. 73.

Hirata W.K., Rigon J.C., Kadekaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da província mineral de Carajás. *In: SBG, Simp. Geol. Amaz.*, Belém. v. 1, p. 100–110.

Horn B.K.P. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proc IEEE*, **69**:14–47.

Hu H., Fernandez-Steeger T.M., Dong M., Nguyen H.T., Azzam R. 2010. 3D modeling using LiDAR data and its geological and geotechnical applications. *In: 18th Int. Conf. IEEE, Geoinformatics.* p. 1–6.

Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellán A., Derron M-H., Loye A., Metzger R., Pedrazzini A. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat hazards. Springer*, **61**:5–28.

Jordan G. & Schott B. 2005. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sens Environ.*, **94**:31–38.

Karnieli A., Meisels A., Fisher L., Arkin Y. 1996. Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a hough transform. *Photogramm Eng Remote Sensing.*, **62**:525–531.

- Koike K., Nagano S., Ohmi M. 1995. Lineament analysis of satellite images using a Segment Tracing Algorithm (STA). *Comput Geosci.*, **21**:1091–1104.
- Krabill W.B., Collins J.G., Link L.E., Swift R.N., Butler M.L. 1984. Airborne laser topographic mapping results. *Photogramm Eng Remote Sensing.*, **50**:685–694.
- Krabill W.B., Thomas R.H., Martin C.F., Swift R.N., Frederick E.B. 1995. Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **16**:1211–1222.
- Kraus K. & Pfeifer N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.*, **53**:193–203.
- Kresic N. 1995. Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric karst. *Remote Sens Environ.*, **53**:85–90.
- Lato M., Diederichs M.S., Hutchinson D.J., Harrap R. 2009. Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *Int J Rock Mech Min Sci. Pergamon*, **46**:194–199.
- Leite A.A.S. 2001. *Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico*. PhD Thesis, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 330p.
- Leite A.A.S., Dall'agnol R., Macambira M.J.B., Althoff F.J. 2004. Geologia e geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara-PA e suas implicações na evolução do terreno granito-greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. *Rev Bras Geociências*, **34**:447–458.
- Lima F.D. 2002. *Evolução tectônica da terminação leste da Falha Carajás, sul do estado do Pará*. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 96p.
- Lindblom S., Broman C., Martinsson O. 1996. Magmatic-hydrothermal fluids in the Pahtohavare Cu-Au deposit in greenstone at Kiruna, Sweden. *Miner Depos. Springer*; **31**:307–318.
- Lindenmayer Z.G. 1990. *Salobo sequence, Carajás, Brazil: geology, geochemistry and metamorphism*. PhD Thesis, University of Western Ontario, Canadá. 407p.
- Lindenmayer Z.G. & Fyfe W.S. 1992. Comparação preliminar entre os metabasaltos dos grupos Parauapebas e Salobo da Bacia Carajás, Estado do Pará. *In: 37º Cong. Bras. Geol., São Paulo. Boletim de resumos expandidos.* p. 33–34.
- Lindenmayer Z.G., Laux J.H., Teixeira J.B.G. 2001. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geociências*, **31**:21–28.

- Lisle R.J. 1996. *Geological structures and maps: a practical guide*. Butterworth-Heinemann.
- Lowe D.R., Byerly G.R., Heubeck C. 1999. Structural divisions and development of the west-central part of the Barberton Greenstone Belt. *Special Papers-Geological Society of America*, 37–82.
- Luinstra B. & Benn K. 2001. *Structural geology of the Holloway mine, Abitibi greenstone belt*. Ontario, Ontario Geological Survey.
- Maas H-G. 2003. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: user requirements and system performance. *Proceedings. Citeseer*, Dresden, 117–125.
- Macambira J.B. 2003. *O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a bacia Grão Para*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 440p.
- Macambira, J.B. & Silva V.F. 1994. Estruturas primárias e diagenéticas preservadas na Formação Carajás, Pará. *In: 4º Simp. Geol. da Amaz., Belém. Boletim de resumos expandidos*, p. 335–337.
- Macambira M.J.B. & Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; Síntese dos dados e novos desafios. *Bol. do Mus. Par. Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*.7:263–287.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Res.*, 49:329–354.
- Marçal M.S. 1991. *Aspectos lito-estruturais das minas de ferro N4E e manganês do azul, serra dos Carajás (PA)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 135p.
- Mardia K.V. 1972. *Statistics of directional data*. Academic press. 357p.
- Marsden R.W. 1977. *Geology of the iron ores of the Lake Superior region in the United States*. US Geological Survey.
- Martinez L. & Ferreira A. 2007. *Análise de Dados com SPSS*. Escolar editora.
- Masoud A.A. & Koike K. 2006a . Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: a case study in the Siwa region, NW Egypt. *J Arid Environ.*, 66:151–167.
- Masoud A.A. & Koike K. 2006b. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *J African Earth Sci.*, 45:467–477.

- Maurity C.W. & Kotschoubey B. 2005. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 - 328 Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *O Carste*, **17**:78–91.
- Meigs A. 2013. Active tectonics and the LiDAR revolution. *Lithosphere*, **5**.
- Meirelles E.M., Hirata W.K., Amaral A.F., Medeiros Filho C.A., Gato W.C. 1984. Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral de Carajás, estado do Pará. In: SBG, 34° Congr. Bras. Geol., Rio de Janeiro. *Anais*. p. 2164–2170.
- Meneses P.R. & Almeida T. 2012. *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília, DF, UnB. (Embrapa Cerrados-Livros técnicos INFOTECA-E).
- Moore G.K. & Waltz F.A. 1983. Objective procedures for lineament enhancement and extraction. *Photogramm Eng Remote Sensing.*, **49**:641–647.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Bol Mus Par Em Goeldi, Ciênc da Terra.*, **7**:177–277.
- Oliveira J.K.M. 2002. *Caracterização estrutural da borda sudeste do Sistema Transcorrente Carajás com ênfase nas rochas do terreno Granítico-Gnáissico*. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Olszewski W., Wirth K., Gibbs A., Gaudette H. 1989. The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. *Precambrian Res.*, **42**:229–254.
- Paradella W.R., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **18**:1483–1501.
- Paradella W.R. & Cheng P. 2013. Using GeoEye-1 stereo data in mining application: automatic DEM generation. *Geoinformatics*, **16**:10–12.
- Paradella W.R., Da Silva M.F.F., Rosa N.A. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **15**:1633–1648.
- Paradella W.R., Santos A.R., Dall’Agnol R., Pietsch R.W., Sant’Anna M.V. 1998. A Geological Investigation Based on Airborne (SAREX) and Spaceborne (RADARSAT-1) SAR Integrated Products in the Central Serra dos Carajás Granite Area, Brazil. *Can J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **24**:376–392.

- Parsons A.J. & Yearley R.J. 1986. An analysis of geologic lineaments seen on LANDSAT MSS imagery. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **7**:1773–1782.
- Pavlis T.L. & Bruhn R.L. 2011. Application of LIDAR to resolving bedrock structure in areas of poor exposure: An example from the STEEP study area, southern Alaska. *Geol Soc Am Bull.* **123**:206–217.
- Peña A.S. 2006. Abdelsalam MG. Orbital remote sensing for geological mapping in southern Tunisia: Implication for oil and gas exploration. *J. African Earth Sci.*, **44**:203–219.
- Petrie G. 2000. Warming up for the ISPRS Amsterdam: a look at current and future imagers, imagery & systems. *Geoinformatics Mag Emmeloord.*, **3**:36–43.
- Petzold B., Reiss P., Stössel W. 1999. Laser scanning—surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.*, Elsevier, **54**:95–104.
- Piló L.B., Coelho A., Reino J.C.R. 2015. Geoespeleologia em rochas ferríferas: cenário atual e conservação. In: Carmo F.F. & Kamino L.H.Y. (org.). *Geossistemas ferruginosos do Brasil*. Belo Horizonte. p. 125–148.
- Pimentel M.M. & Machado N. 1994. Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. In: 38° SBG, Cong. Bras. Geol., Camboriú. *Boletim de Resumos Expandidos*. v. 2, p. 390-391.
- Pinheiro R.V.L. 1997. *Reactivation history of the Carajas and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil*. PhD Thesis, University of Durhan, Durhan. 408 p.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 1997a. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *J Geol Soc London*, **154**:99–103.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 1997b. The structure of the Carajás N-4 ironstone deposit and associated rocks: relationship to Archaean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil. *J South Am Earth Sci.*, **10**:305–319.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 2000a. Evolução tectonoestratigráfica dos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Craton Amazônico, Pará. *Rev Bras Geociências*, **30**:597–606.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 2000b. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Craton Amazônico, Pará. *Rev Bras Geociências*, Sociedade Brasileira de Geologia, **30**:597–606.
- Ramsay J.G. 1980. Shear zone geometry: a review. *J Struct Geol.*, Elsevier, **2**:83–99.

- Raper J. 1989. *Three dimensional applications in GIS*. CRC Press.
- Resende N.P. & Barbosa A.L.M. 1972. *Relatório de pesquisa de minério de ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, estado do Pará. Belém, AMZA. 1, 248p. (Relatório Final)*.
- Ribeiro D.T. 2003. *Enriquecimento Supergênico de Formações Ferríferas Bandadas: Estruturas de colapso e desordem*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*. 123p.
- Ricchetti E. & Palombella M. 2005. Application of Landsat 7 ETM+ imagery for geological lineament analysis of Southern Italy. *In: IEEE Int Geosci Remote Sens Symp. Proceedings...* p. 5200–5203.
- Rios F.J., Villas R.N.N., Dallagnol R. 1995. O granito serra dos Carajás: 1. fácies petrográficas e avaliação do potencial metalogenético para estanho no setor norte. *Rev Bras Geociências*, **25**:20–31.
- Rivas R.A.N., Brito J.L.N.S., A. J.L.N. 2003. A tecnologia “Laser Scanning”: uma alternativa para o mapeamento topográfico. *In: 21º Cong. Bras. Cartogr.*
- Rodrigues E.S., Lafon J.M., Scheller T. 1992. Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. *In: 37º Cong. Bras. Geol., Sao Paulo. Bol Resumos Expand.* p. 183–184.
- Ronde C.E.J. & Wit M.J. 1994. Tectonic history of the Barberton greenstone belt, South Africa: 490 million years of Archean crustal evolution. *Tectonics*, Wiley Online Library, **13**:983–1005.
- Ropchan J.R., Luinstra B., Fowler A.D., Benn K., Ayer J., Berger B., Dahn R., Labine R., Amelin Y. 2002. Host-rock and structural controls on the nature and timing of gold mineralization at the Holloway Mine, Abitibi Subprovince, Ontario. *Econ Geol. SecG*, **97**:291–309.
- Rosière C.A., Baars F.J., Seoane J.C.S., Lobato L.M., da Silva L.L., de Souza S.R.C., Mendes G.E. 2006. Structure and iron mineralisation of the Carajás Province. *Appl Earth Sci.*, **115**:126–133.
- Rosière C.A. & Chemale Jr F. 2000. Brazilian iron formations and their geological setting. *Rev Bras Geociências*, **30**:274–278.
- Saha A.K., Gupta R.P., Arora M.K. 2002. GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **23**:357–369.
- Santos J.A. 2016. *Análises texturais de produtos derivados de LiDAR para discriminação de cangas lateríticas, Serra Sul de Carajás (Pa)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

Santos J.O.S. 2003. *Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. Geol tectônica e Recursos minerais do Bras Texto, mapas SIG*. CPRM—Serviço Geológico do Bras. p.169–226.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Res.*, Elsevier, **3**:453–488.

Santos M.J.P., Lamarão C.N., Lima P.H.A., Galarza M.A., Mesquita J.C.L. 2013. Granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás, sudeste do estado do Pará: petrografia, geoquímica e geocronologia Archean granitoids of the Água Azul do Norte region, Carajás Province, southeast of Pará State: petrography, geoch. *Bol do Mus Para Emílio Goeldi*, **8**:29.

Santos P.J.L. & Oliveira D.C. 2014. Trondhjemitos da área de Nova Canadá: novas ocorrências de associações magmáticas tipo TTG no Domínio Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Terra*, **9**:635–659.

Sartorato G.B. 1998. *Análise estatística de lineamentos extraídos de imagem LANDSAT-TM da porção Norte do Quadrilátero Ferífero, Minas Gerais*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Sato K. & Tassinari C.C.G. 1997. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade-modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In: Costa M.L & Angélica R.S. (coord.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, SBG-NO, v. 1, p. 91–142.

Sawatzky D.L, Raines G.L., Bonham-Carter G.F., Looney C.G. 2010. *Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 10 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks*. Disponível em: <<http://arcscrips.esri.com/details.asp?dbid=15341>>. Acesso em: 08 jan. 2018.

Scheiber T, Fredin O, Viola G, Jarna A, Gasser D, Łapińska-Viola R. 2015. Manual extraction of bedrock lineaments from high-resolution LiDAR data: methodological bias and human perception. *GFF*. Taylor & Francis; 137:362–372.

Schumann G., Matgen P., Cutler M.E.J., Black A., Hoffmann L., Pfister L. 2008. Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS J Photogramm Remote Sens. Elsevier*, **63**:283–296.

Silva A.C, Dall’Agnol R., Guimarães F.V., Oliveira D.C. 2014. Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemiticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. *Bol do Mus Para Emílio Goeldi, Série Ciências Nat.*, 13–45.

Silva A.Q. 2010. *Avaliação de imagens SAR no mapeamento de crostas lateríticas do*

depósito NI, Província Mineral de Carajás, Pará. PhD Thesis, INPE, São José dos Campos. 233p.

Singhroy V., Slaney R., Lowman P., Harris J., Moon W. 1993. RADARSAT and Radar Geology in Canada. *Can J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **19**:338–351.

Soares P.C. & Fiori A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, **16**:71–104.

Sousa S.D., Oliveira D.C., Gabriel E.O., Macambira M.J.B. 2010. Geologia, petrografia e geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da porção a leste da cidade de Água Azul do Norte (PA)–PMC. In: 45° SBG, Cong. Bras. Geol., Belém. *Anais*.

Souza S.R.B. 1996. *Geocronologia e geoquímica isotópica da região do Igarapé Pojuca, Serra dos Carajás*. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 106p.

Souza Z.S., Potrel A., Lafon J-M, Althoff F.J., Pimentel M.M., Dall’Agnol R., de Oliveira C.G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Res.*, Elsevier, **109**:293–315.

Starek M.J. 2016. Airborne Laser Terrain Mapping (ALTM) BT. In: Kennish M.J. (org.). *Encyclopedia of Estuaries*. Dordrecht, Springer Netherlands, p. 4–7.

Suzen M.L., Toprak V. 1998. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: An application to a fault zone in Central Turkey. *Int J Remote Sens.*, Taylor & Francis, **19**:1101–1114.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. Geol do Cont sul-americano evolução da obra Fernando Flávio Marques Almeida. In: Mantesso- Neto, Bartorelli A., Carnerio C.D.R., Brito- Neves B.B.(org.). *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Editora Beca, p. 471–485.

Taylor D., Dalstra H.J., Harding A.E., Broadbent G.C., Barley M.E. 2001. Genesis of high-grade hematite orebodies of the Hamersley Province, Western Australia. *Econ. Geol. Society of Economic Geologists*, **96**:837–873.

Teixeira M.F.B., Dall’Agnol R., Silva A.C., Santos P.A. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica do Leucogranodiorito Pantanal e dos leucogranitos arqueanos da área a Norte de Sapucaia, Província Carajás, Pará: implicações petrogenéticas. *Bol. do Mus. Paraense Emílio Goeldi-Série Ciências Nat.*, **8**:291–323.

Tolbert G.E., Tremaine J.W., Malcher, G.C., Gomes C.B. 1971. The Recently Discovered Serra dos Carajás Iron Deposits,. *Econ Geol.*, **66**:985–994.

Trendall A.F, Basei M.A.S., De Laeter J.R. Nelson D.R. 1998. SHRIMP zircon U–Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. *J South Am Earth Sci.*, Elsevier, **11**:265–277.

Tunks A.J, Selley D., Rogers J.R., Brabham G. 2004. Vein mineralization at the Damang Gold Mine, Ghana: controls on mineralization. *J Struct Geol.*, Elsevier, **26**:1257–1273.

Vale. 2008. *Avaliação de Recursos de Minério de Ferro jazida de Serra Sul- Alvo S11 - Corpos C e D*. Belo Horizonte.

Vale S.A. 2013. *Projeto ferro Carajás S11D: um novo impulso ao desenvolvimento sustentável do Brasil*. Rio Janeiro. Disponível em: <www.vale.com/PT/initiatives/.../s11d/.../book-s11d-2013-pt.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2018

Vasquez L.V. *et al.* 2008. *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*. Belém, CPRM.

Veneziani P., Santos A.R. dos, Paradella W.R. 2004. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM LANDSAT-5), aerogeofísica e dados de campo. *Rev Bras Geociências*, **34**: 67–78.

Wallace J, Morris B, Howarth P. 2006. *Identifying structural trend with fractal dimension and topography*. Geological Society of America, v. 34, p. 901.

Wehr A. & Lohr U. 1999. Airborne laser scanning--an introduction and overview. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.*, **54**:68–82.

Weitkamp C. 2006. *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer Science & Business

Willis B. 1893. Mechanics of Appalachian structure. USGS Annual Report 13 (1891-1892). *Struct Geol Fold Thrust Belts*, **5**: p.191–206.

Wirth K.R., Gibbs A.K, Olszewski Junior W.J. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão-Pará group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Rev Bras Geociências*, **16**:195–200.

Wladis D. 1999. Automatic Lineament Detection Using Digital Elevation Models with Second Derivative Filters. *Photogramm Eng Remote Sens.*, **65**.

Woodward N.B. 2012. Evaluation, analysis and prediction of geologic structures. *J Struct Geol.*, Elsevier, **41**:76–85.

Zhiqing L., Huirong Z., Qiang W., Chen L., Shen C., Xiuquan D., Xi W. 2006. *The Airborne LiDAR Technology*, [J]. L Resour Informatiz. 2.

Zuber M.T., Smith D., Solomon S.C., Muhleman D.O., Head J.W., Garvin J.B., Abshire J.B., Bufton J.L. 1992. The Mars Observer laser altimeter investigation. *J Geophys Res Planets*, *Wiley Online Library*, **97**:7781–7797.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

PARECER

Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de FRANCISCO RIBEIRO DA COSTA

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **FRANCISCO RIBEIRO DA COSTA** orientando do Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA), composta pelos professores doutores Venerando Eustáquio Amaro (UFRN), Carlos Eduardo de Mesquita Barros (UFPR), Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA) e Moacir José Buenano Macambira (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**USO DE LIDAR AEROTRANSPORTADO PARA MAPEAMENTO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE DEPÓSITOS FERRÍFEROS NA SERRA SUL DE CARAJÁS, AMAZÔNIA**”, emite o seguinte parecer:

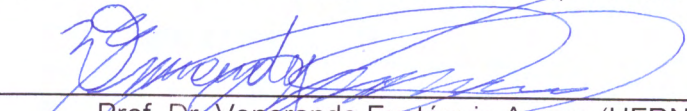
O candidato realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada e segura no tempo estipulado. Na arguição mostrou domínio da temática abordada e respondeu às perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma tradicional com problemas de formatação, no entanto, atendeu as exigências para uma tese de doutorado.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

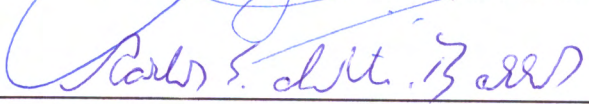
Belém, 29 de março de 2018.



Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador – UFPA)



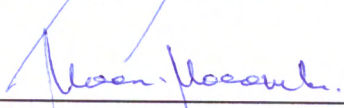
Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (UFRN)



Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros (UFPR)



Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA)



Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira (UFPA)