



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
NÍVEL DOUTORADO

REGINALDO MACEDÔNIO DA SILVA

**ANÁLISE DA EXATIDÃO POSICIONAL NA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE
(SUB)SUPERFÍCIE EM MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTOS A PARTIR DE
SENSORES REMOTOS NÃO ORBITAIS**

SÃO LEOPOLDO

2014

REGINALDO MACEDÔNIO DA SILVA

**ANÁLISE DA EXATIDÃO POSICIONAL NA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE
(SUB)SUPERFÍCIE EM MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTOS A PARTIR DE
SENSORES REMOTOS NÃO ORBITAIS**

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Área de Concentração: Geologia Sedimentar

Linha de Pesquisa: Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica

Orientador: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco M. W. Tognoli

São Leopoldo

2014

S586a

Silva, Reginaldo Macedônio da.

Análise da exatidão posicional na integração de dados de (sub)superfície em modelos digitais de afloramentos a partir de sensores remotos não orbitais / Reginaldo Macedônio da Silva. – 2014.

107 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Geologia, 2014.

"Orientador: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez ; co-orientador: Prof. Dr. Francisco M. W. Tognoli."

1. Sensoriamento remoto. 2. Modelagem geológica. 3. Modelo Digital de Afloramento. 4. LIDAR. 5. GPR. 6. GNSS. I. Título.

CDU 55

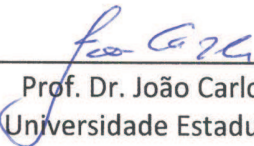
A tese de doutorado

**“ANÁLISE DA EXATIDÃO POSICIONAL NA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE (SUB)SUPERFÍCIE EM
MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTOS A PARTIR DE SENSORES REMOTOS NÃO ORBITAIS”**

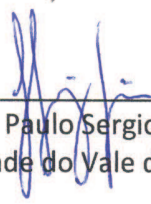
apresentada por **Reginaldo Macedônio da Silva**

foi aceita e aprovada como atendimento parcial aos requisitos para a obtenção do grau de

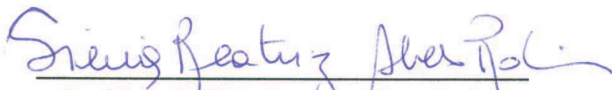
DOUTOR EM GEOLOGIA pela seguinte banca examinadora:



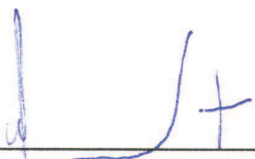
Prof. Dr. João Carlos Chaves
Universidade Estadual Paulista



Prof. Dr. Paulo Sergio Gomes Paim
Universidade do Vale do Rio dos Sinos



Prof.ª Dr.ª Silvia Beatriz Alves Rolim
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez
Presidente da Banca Examinadora
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

São Leopoldo, 11 de agosto de 2014.

Dedico esta tese à minha esposa Claudiana, à minha filha semente da vida, Camila, à minha irmã e a pessoa responsável por eu estar neste mundo, minha Mãe Dona Josefa, que me ensinou muito mais do que qualquer livro.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por ter me dado saúde (algo tão valioso que só respeitamos, quando não a temos), sabedoria, vontade e perseverança para executar este trabalho.

Agradeço à minha família pela paciência nesses tempos de doutorado, principalmente à minha esposa (Claudiana), por suportar as minhas ausências quando estava nos trabalhos de campo e na correria do dia a dia, assim como à minha filha (Camila), que me inspira a cada dia.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez pela paciência em me orientar nesse trabalho, compreendendo as dificuldades do desafio de executar uma tese numa área diferente da minha formação, mas com tecnologias condizentes com ela.

Agradeço ao co-orientador, Prof. Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli, por tirar dúvidas na área da geologia e nos capítulos em inglês.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Gomes Paim, pela paciência e auxílio na interpretação das seções geofísicas, pois os teus ensinamentos foram de fundamental importância, para que eu compreendesse melhor os elementos arquiteturais presentes nos dados GPR.

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Jr. pela ajuda no inglês do capítulo 3 e por tirar dúvidas sobre o conceito da geometria epipolar.

Agradeço ao Prof. Ms. Leonardo Campos Inocencio pela participação no trabalho de campo do Laser Scanner Terrestre e por tirar dúvidas sobre uso do software Cyclone.

Agradeço aos colegas do LASERCA, que participaram nos trabalhos de campo, como Evandro Kirst, Beto Saraiva dos Reis, Marcos Turani, que trabalham atualmente, mas também, aqueles que trabalharam no laboratório como André Tauchert, Luiz Felipe Monteiro Nascimento.

Agradeço às bolsistas Larissa Jacobi e Débora Lamberty pela participação nos trabalhos de campo e pelas discussões sobre a geologia do afloramento.

Agradeço aos colegas do PPGeo que participaram do trabalho de campo como Marcelo Kehl de Souza e Natália Braun dos Santos, pela dedicação no levantamento das seções geofísicas, pois é um trabalho que necessita de pelo menos 4 pessoas, devido as variações no relevo do terreno, assim como os obstáculos presentes no afloramento.

Agradeço a CAPES/PROSUP pela bolsa concedida, pois este apoio foi fundamental para que eu pudesse trabalhar nesse desafio.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro aos projetos NEAP (Núcleo de Estratigrafia Aplicada, Convênio 16 – SAP 4600242459) e “Mapeamento 3D Georreferenciado de Afloramentos Utilizando uma Técnica LIDAR (*Light Detection And Ranging*)”, (Termo de Cooperação 0050 0044869. 08.4 - SAP: 4600285973), ambos financiados pela Rede Tecnológica em Sedimentologia e Estratigrafia.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para realização desse trabalho, e mesmo que o nome não esteja aqui, jamais serão esquecidos.

RESUMO

O crescente avanço de novas tecnologias na área das geociências, como o posicionamento por *GNSS*, o mapeamento por *GPR* ou a geração de modelos tridimensionais com a técnica *LIDAR* permite a integração de técnicas de sensoriamento remoto em diferentes aplicações nas geociências. Para isso é necessário experimentar, testar e avaliar cientificamente o potencial de integração dessas diferentes tecnologias, de forma a explorar em sua plenitude os diferentes tipos de dados. A análise, descrição e interpretação de afloramentos são atividades corriqueiras dos trabalhos de campo geológicos. Apesar do avanço tecnológico das últimas décadas, a obtenção de dados quantitativos a partir do uso de instrumentos não se sobrepôs à tradicional forma de aquisição de dados pelos geólogos: a observação da rocha. Dessa forma, o estudo de afloramentos constitui uma fonte indispensável para a obtenção de dados intermediários entre as escalas megascópica (e.g., geologia regional) e microscópica (e.g., amostra), que por sua natureza são dependentes de aquisição por sensores remotos e instrumentos diversos. O principal desafio em pesquisas dessa natureza é integrar dados quantitativos e digitais, obtidos por instrumentos com diferentes princípios de aquisição e integrá-los aos dados qualitativos e analógicos obtidos pela subjetividade da percepção do geocientista. O objetivo deste trabalho foi analisar, testar e validar essa abordagem multidisciplinar para a modelagem de afloramentos considerando um estudo de caso real no Afloramento Morro Papaléo. Para tanto, considerou-se como premissa que o modelo geológico resultante da integração de dados de diferentes naturezas não tivesse erro posicional em ordem de grandeza superior à resolução espacial do sensor com maior limitação de amostragem. A integração de dados segundo procedimentos metodológicos adequados permitiu gerar um Modelo Digital de Afloramento (MDA) que tornou possível visualizar, medir e interpretar com exatidão a geologia a partir de uma representação geológica do objeto de estudo. A validação de campo foi realizada para assegurar que a qualidade da metodologia proposta pode ser utilizada nesse tipo de estudo. Quanto aos dados de subsuperfície, por meio de seções geofísicas, foi possível estabelecer correlações entre os dados obtidos com a técnica *LIDAR*, o que permitiu integrar dados de superfície e de subsuperfície. Portanto, com o estabelecimento do modelo 3D gerado numa base de dados consistente, calibrada e validada pode-se a qualquer tempo adicionar dados e incrementar o modelo de forma dinâmica.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Modelagem Geológica, Modelo Digital de Afloramento, *LIDAR*, *GPR*, *GNSS*

ABSTRACT

The increasing advance of new technologies in the field of geosciences, such as GNSS positioning, mapping by GPR or the generation of three dimensional models with the LIDAR technique allows the integration of orbital and non-orbital remote sensing techniques for different applications in geosciences. Thus, it is necessary to experiment, test and scientifically evaluate the potential of integration of these different technologies in order to explore the different types of data. The analysis, description and interpretation of outcrops are daily activities of the geological fieldwork. Despite the technological advances in the last decades, the acquisition of quantified data from instruments and sensors did not substitute the traditional source of data of the geologists: the observation of the rock. Thus, the study of outcrops is fundamental in the acquisition of intermediate data between the megascopic (*e.g.* regional geology) and microscopic scales (*e.g.*, sample), quite dependent of acquisition by remote sensors and instruments. The main challenge in this type of research is to integrate quantitative digital data obtained by instruments and sensors based on different principles with qualitative, analogic data, obtained by the subjective perception of the geoscientist. The main purpose of this study was to analyze, test and validate this multidisciplinary approach to the modeling of outcrops considering a real case study in Morro Papaléo Outcrop. For this, it was considered as a premise that the geological model resulting from the integration of different data had not a positional error in an order of magnitude higher than the spatial resolution of the more limited sensor. The data integration using appropriate methodological procedures allowed generate a Digital Outcrop Model (DOM) which made it possible to view, measure and accurately interpret the geology from a 3D geological representation. The field validation was performed to ensure that the quality of the proposed methodology can be used in this type of study. Through geophysical sections was possible to correlate subsurface data with those obtained with the LIDAR technique, allowing data integration of surface and subsurface data. Therefore, with the establishment of the 3D model generated in a consistent database, calibrated and validated, at any time more data can be added to this dynamic model.

Keywords: Remote Sensing, Geological Modeling, Digital Outcrop Model, LIDAR, GPR, GNSS

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1:INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, HIPÓTESES E OBJETIVOS, REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
1.1 INTRODUÇÃO	6
1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
1.2.1 A Tecnologia Laser Scanner 3D Terrestre – LST.....	8
1.2.2 A Tecnologia GPR (Ground Penetration Radar).....	11
1.2.3 A Modelagem Geológica.....	21
1.3 CONCEITOS SOBRE SISTEMAS FLUVIAIS	23
1.3.1 Processos Fluviais.....	23
1.3.2 O Processo Erosivo Fluvial	23
1.3.3 O Processo de Transporte e Deposição Fluvial	24
1.3.4 Litofácies	24
1.3.5 Elementos Arquiteturais.....	26
1.3.6 Classificação dos Estilos Fluviais.....	30
1.3.7 Contexto Geológico – Bacia do Paraná – Formação Rio Bonito.....	34
1.4 HIPÓTESES E OBJETIVOS	39
1.4.1 Objetivos	39
1.4.2 Organização dos Capítulos da tese.....	39
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CAPÍTULO 2:ACCURACY ANALYSIS OF DIGITAL OUTCROP MODELS OBTAINED FROM TERRESTRIAL LASER SCANNER (TLS).....	47
2.1 INTRODUCTION.....	47
2.2 MATERIAL AND METHODS	48
2.3 RESULTS AND DISCUSSIONS.....	50
2.4 CONCLUSIONS	53
2.5 ACKNOWLEDGMENTS.....	53
2.6 REFERENCES.....	53
CAPÍTULO 3:ACCURATE DIGITAL OUTCROP MODELS BASED ON IMAGE-BASED MODELING 56	
3.1 INTRODUCTION	56
3.2 3D RECONSTRUCTION MODEL FROM MULTIPLE IMAGES	57
3.3 MATERIALS AND METHODS	59
3.3.1 Materials	59
3.4 RESULTS AND DISCUSSION.....	63
3.5 CONCLUSION	69
3.6 REFERENCES	70
CAPÍTULO 4:MODELAGEM DIGITAL DE DADOS GEOLÓGICOS DO AFLORAMENTO MORRO PAPALÉO, COM BASE NA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE (SUB) SUPERFÍCIE	74
4.1 INTRODUÇÃO	74
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS	76
4.2.1 Materiais	76
4.2.2 – Métodos – Dados de Superfície.....	77
4.2.2.1 – Coleta dos Dados GNSS – Rastreamento do Marco Geodésico	78
4.2.2.2 – Transporte de coordenadas e Imageamento do Afloramento - Laser Scanner Terrestre.....	79
4.2.2.3 - Processamento dos Dados do Laser Scanner Terrestre	82
4.2.2.4 - Levantamento Topográfico do Topo do Afloramento.....	83
4.2.2.5 - Implantação das Linhas Geofísicas para Medição com equipamento GPR (Ground Penetration Radar)	87

4.2.3 – Métodos – Dados de Subsuperfície	89
4.2.3.1 - Levantamento das Seções Geofísicas	90
4.2.3.2 - Processamento dos Dados Geofísicos	90
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
4.3.1 Integração dos Dados de Superfície e Subsuperfície do Afloramento	94
4.4 CONCLUSÃO	101
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
5.1 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Caminho dos sinais (pulso) transmitidos e recebidos por um equipamento <i>Laser Scanner</i> Terrestre (adaptado de Heritage and Large, 2009).....	8
Figura 1.2 - Funcionamento do pulso pelo tempo de voo (TOF) – Inocencio <i>et al.</i> , 2014.....	9
Figura 1.3 - Funcionamento pela diferença de – Inocencio <i>et al.</i> , 2014.....	9
Figura 1.4 - Caminho dos sinais transmitidos e recebidos por uma antena <i>GPR</i> (adaptado de Neal, 2004)....	16
Figura 1.5 - Radargrama com o resultado da reflexão dos traços individuais obtidos da antena <i>GPR</i> , indicando onda área, onda de superfície e refletores primário (adaptado de Neal, 2004).....	12
Figura 1.6 - Radargrama do Morro Papaléo – Antena de 100 MHz – Seção N4-N1.....	19
Figura 1.7 - Antena blindada – <i>Shielded</i>	19
Figura 1.8 - Antena não blindada – <i>Snake</i>	20
Figura 1.9 - Aquisição de dados <i>GPR</i> no Morro Papaléo com o uso de uma antena <i>Snake</i>	17
Figura 1.10 - Radargrama – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.....	19
Figura 1.11 - Radargrama Interpretado – Antena de 50 MHz – Morro Papaléo.....	22
Figura 1.12 - Radargrama interpretado com identificação de canais amalgamados (adaptado de Menezes, 2004).....	24
Figura 1.13 - Radargrama – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.....	21
Figura 1.14 - Radargrama Interpretado – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.....	21
Figura 1.15 – Medição de camadas do afloramento com o uso de trena – método tradicional.....	22
Figura 1.16 - Migração Lateral – Adaptado de Schumm (1994).....	24
Figura 1.17- Elementos arquiteturais – interno aos canais fluviais (adaptado de Miall, 1996).....	29
Figura 1.18 - Elementos arquiteturais – externo aos canais fluviais (adaptado de Miall, 1996).....	32
Figura 1.19 - Bacia de inundação fluvial (adaptado de Lange, 2012).....	33
Figura 1.20 - Modelo teórico de um sistema meandriforme (adaptado de McKnight and Hess, 2012).....	34
Figura 1.21 - - Rio Jacuá – representação real do modelo teórico apresentado na figura 9 (Fonte: Google Earth 2012).....	32
Figura 1.22 - Medidas utilizadas no cálculo do <i>braiding parameter</i> (adaptado de Friend & Sinha, 1993).....	33
Figura 1.23 - Canal simples com alta sinuosidade – Rio Meandrante (Miall, 1985).....	34
Figura 1.24 - Localização e distribuição das superseqüências da Bacia do Paraná (Boardman, 2011).....	35
Figura 1.25 - Distribuição das superseqüências estratigráficas da Bacia do Paraná com a localização do município de Mariana Pimentel. (Smaniotto <i>et al.</i> , 2006).....	36
Figura 1.26 - Localização das Jazidas de Carvão no Paleovale Mariana Pimentel (Boardman, 2011).....	36
Figura 1.27 - Localização do Afloramento Papaléo no Paleovale Leão-Mariana Pimentel.....	37
Figura 1.28 - Identificação da camada de carvão no Afloramento Morro Papaléo.....	38
FIGURE 2.1 - LOCATION OF STUDY AREA.....	48
FIGURE 2.2 - PART OF THE WEST SIDE OF MORRO PAPALÉO OUTCROP IN MARIANA PIMENTEL CITY. NOTE THE LITHOLOGICAL LOG.....	49
FIGURE 2.3- GEODETIC DATA ACQUISITION IN THE OUTCROP. (A) TRACKING OF POINTS P1 AND P2 WITH THE USE OF GNSS-RTK. (B) POINTS MEASURED WITH TOTAL STATION.....	49
FIGURE 2.4 - DIGITAL REPRESENTATION OF THE MORRO PAPALÉO OUTCROP. (A) TLS LEICA SCANN STATION C10. (B) POINT CLOUD ACQUIRED WITH THE TLS.....	50
FIGURE 2.5 - CORRELATION BETWEEN THE MEASURED COORDINATES WITH TOTAL STATION AND TLS TO EAST (A), NORTH (B), AND HEIGHT (C).....	51

FIGURE 2.6 - DIGITAL OUTCROP MODEL. (A) COMPARISON BETWEEN PHOTOMOSAIC AND DIGITAL OUTCROP MODEL. (B) NOTE THE DEFORMATION OF THE COMPOUND PHOTOGRAPHS. RED ARROWS SHOW FEATURES SEEN IN BOTH IMAGES.....	52
FIGURE 2.7 - COAL BED SEEN IN BOTH THE WEST AND EAST SIDE OF THE OUTCROP. (A, B) POINT CLOUD OF THE OUTCROP WITH THE INTERPRETATION OF THE COAL BED ON THE WEST SIDE (A) AND EAST SIDE (B). (C) THE COAL BED GENERATED FROM THE INTERPRETATION IN POINT CLOUD. (D) TRIANGULATION OF THE POINT CLOUD (WEST SIDE) WITH THE INTERPRETATION OF THE COAL BED.	52
FIGURE 3.1 – PINHOLE CAMERA (A) MODEL (B).....	58
FIGURE 3.2 – TWO CAMERAS WITH EPIPOLAR CONSTRAINTS.	58
FIGURE 3.3 – LOCATION MAP OF THE STUDY AREA.	61
FIGURE 3.4 – TRACKING OF POINTS P1 AND P2 WITH THE USE OF GNSS-RTK (A). POINTS OF THE SURFACE OUTCROP MEASURED WITH TOTAL STATION (B).....	61
FIGURE 3.5 – POINT CLOUD OBTAINED WITH THE TERRESTRIAL LASER SCANNER (SILVA ET AL., 2014).	62
FIGURE 3.6 – PICTURES OBTAINED WITH THE CAMERA (A). POSITION OF CAMERA (B).	63
FIGURE 3.7- 3D RECONSTRUCTION FROM PHOTOS (A) AND TERRESTRIAL LASER SCANNER.	63
FIGURE 3.8 - CORRELATION BETWEEN THE MEASURED COORDINATES WITH TOTAL STATION AND IMAGE-BASE MODELING TO EAST (A), NORTH (B), HEIGHT (C) AND LINEAR ERROR (D).	65
FIGURE 3.9 – CORRELATION BETWEEN THE MEASURED COORDINATES WITH TOTAL STATION AND TLS TO EAST (A), NORTH (B), HEIGHT (C) AND LINEAR ERROR (D).....	66
FIGURE 3.10 - OVERLAPPING IMAGE-BASE MODELING AND TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUD	66
FIGURE 3.11– OVERLAPPING IMAGE-BASE MODELING AND TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUD - ANOTHER PERSPECTIVE	67
FIGURE 3.12 - CORRELATION BETWEEN TERRESTRIAL LASER SCANNER AND IMAGE-BASE MODELING (PHOTO) TO EAST (A), NORTH (B), HEIGHT (C) AND LINEAR ERROR (D).	67
FIGURE 3.13 - LINEAR MEASUREMENTS (METERS) FROM A POINT CLOUD DETAIL – TERRESTRIAL LASER SCANNER.....	68
FIGURE 3.14 - LINEAR MEASUREMENTS (METERS) FROM A POINT CLOUD DETAIL – IMAGE-BASE MODELING.....	68
Figura 4.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	76
Figura 4.2 - Fluxograma 1 - etapas necessárias na obtenção de dados de superfície	77
Figura 4.3- Marco Geodésico (ponto base)	89
Figura 4.4 (A, B e C) – (4.4A) Pontos de controle dos lados leste e oeste do afloramento – (4.4B) Ponto de controle medido com GNSS-RTK – (4.4C) Instalação do laser scanner no ponto de controle (lado oeste)....	94
Figura 4.5 – Nuvem de pontos obtida com Laser Scanner Terrestre.....	78
Figura 4.6 – Organograma do processamento dos dados do Laser Scanner Terrestre – Adaptado de Nguyen et al., 2011	80
Figura 4.7- Visualização da nuvem de pontos (X, Y, Z e RGB) importada no software Cyclone, com os lados leste e oeste do afloramento.....	81
Figura 4.8 (A, B e C) – (4.8A) Nuvem de pontos sem a limpeza de obstruções – (4.8B) Nuvem de pontos com a limpeza da obstruções – (4.8C) Triangulação executada no software GOCAD, com uma linha inserida a partir da medição de campo com estação total	84
Figura 4.9 (A, B e C) – (4.9A) Marco Geodésico e (4.9B e 4.9 C) Pontos topográficos medidos com GNSS Geodésico de Dupla Frequência com Link de Rádio	85
Figura 4.10 – Pontos topográficos medidos com Estação Total.....	86
Figura 4.11- Curvas de nível do topo do afloramento.....	87
Figura 4.12 – Linhas geofísicas para o levantamento da seções (subsuperfície) com equipamento GPR	89
Figura 4.13 (A, B e C) – Locação dos pontos (seções GPR) no topo do afloramento – (4.13A) ponto base – (4.13B) locação – (4.13C) ponto locado.....	89
Figura 4.14 – Fluxograma 2 – etapas necessárias na obtenção de dados de subsuperfície.....	89
Figura 4.15 (A e B) – Levantamento de campo das seções geofísicas com GPR - (4.15A) Área acidentada – (4.15B) Arbustos médios.....	92
Figura 4.16 – Sequência de processamento dos dados das seções GPR – Adaptado de Rodrigues, 2004.....	93

Figura 4.17 (A, B e C) – Radargramas da seção transversal (25-28) – (4.17A) Dados brutos – (4.17B) Subtração da média (subtraion-mean) – (4.17C) Correção do tempo zero (static correction)	82
Figura 4.18 (A, B e C) – Radargramas da seção transversal (25-28) – (4.18A) Decaimento de energia (energy decay) – (4.18B) Correção da topografia (correct 3D topography) – (4.18C) Conversão do tempo em profundidade (time-deph).....	93
Figura 4.19 – Fluxograma 3 – modelagem dos dados.....	94
Figura 4.20 - Modelagem da camada de carvão.....	95
Figura 4.21 - Interpretação de elemento arquitetural (canal) em fotografia, modelo digital tridimensional e em seção geofísica.....	97
Figura 4.22 - Refletores interpretados nos dados geofísicos	97
Figura 4.23 - Superfície interpoladas a partir da correlação entre as seções geofísicas e da nuvem de pontos do <i>laser scanner</i> terrestre	97
Figura 4.24 (A, B e C) - (4.24A) Curvas de nível inseridas sobre as seções geofísicas – (4.24B) Modelagem do topo do afloramento com as curvas de nível e as seções geofísicas – (4.24C) Curvas de nível sobrepostas à topografia do terreno das seções geofísicas.....	98
Figura 4.25 Orientação dos paleocanais interpretada nas seções geofísicas	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS LST	10
TABELA 1.2 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE ALGUNS MATERIAIS.	13
TABELA 1.3 - FREQUÊNCIA, PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO E RESOLUÇÃO TEÓRICA.	16
TABELA 1.4 - AMPLITUDE, CONTINUIDADE, CONFIGURAÇÃO E FORMA EXTERNA EM AMBIENTE FLUVIAL (ADAPTADO DE AKINPELU, 2010).	18
TABELA 1.5 - CLASSIFICAÇÃO DE LITOFÁCEIS FLUVIAIS (ADAPTADO DE MIAL, 1996).	25
TABELA 1.6 - ELEMENTOS ARQUITETURAIS FORMADOS DENTRO DE CANAIS FLUVIAIS (ADAPTADO DE MIAL, 1996).	27
TABELA 1.7 - ELEMENTOS ARQUITETURAIS FORMADOS NA ÁREA EXTERNA AOS CANAIS FLUVIAIS (ADAPTADO DE MIAL, 1996).	29
TABELA 1.8 - DENOMINAÇÕES DO MODELO TEÓRICO (MIAL, 1996).	31
TABELA 1.9 - DINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (MIAL, 1996).	32
TABELA 1.10 - MORFOLOGIAS DE CANAIS ALUVIAIS CLASSIFICADO PELAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (RUST, 1978).	33
TABLE 2.1 - PLANE COORDINATES IN UTM PROJECTION OF THE SURVEYING SUPPORT POINTS, CENTRAL MERIDIAN AT 51°W - SIRGAS2000 REFERENCE SYSTEM (GEOCENTRIC REFERENCE SYSTEM FOR THE AMERICAS).	49
TABLE 2.2 - PLANE COORDINATES IN UTM PROJECTION OF THE SURVEYING SUPPORT POINTS, CENTRAL MERIDIAN AT 51°W - SIRGAS2000 REFERENCE SYSTEM (GEOCENTRIC REFERENCE SYSTEM FOR THE AMERICAS)	51
TABLE 3.1 - PLANE COORDINATES IN UTM PROJECTION OF THE POINTS OF SUPPORT FOR SURVEYING, CENTRAL MERIDIAN AT -51° SIRGAS2000 REFERENCE SYSTEM (GEOCENTRIC REFERENCE SYSTEM FOR THE AMERICAS).	60
TABLE 3.2 – COORDINATE MEASURES WITH TOTAL STATION	61
TABLE 3.3 - LINEAR ERROR OF THE IMAGE-BASE MODELING POINT CLOUD.	64
TABLE 3.4– LINEAR ERROR OF THE TLS POINT CLOUD (SILVA ET AL., 2014).	64
TABLE 3.5 - DIFFERENCE BETWEEN LINEAR MEASUREMENTS OBTAINED FROM THE MODELS GENERATED	68
TABELA 4.1- COORDENADAS OFICIAIS DO VÉRTICE SMAR – REFERÊNCIA SIRGAS – 2000	78
TABELA 4.2 - COORDENADAS OFICIAIS DO VÉRTICE POAL – REFERÊNCIA SIRGAS – 2000	79
TABELA 4.3- COORDENADAS PROCESSADAS DO PONTO BASE INSTALADO NO TOPO DO AFLORAMENTO. SISTEMA DE REFERÊNCIA SIRGAS2000 E MERIDIANO CENTRAL 510 W.	79
TABELA 4.4- COORDENADAS DOS PONTOS DE IMAGEAMENTO DO AFLORAMENTO OBTIDAS A PARTIR DO PONTO BASE, COM O GNSS-RTK. SISTEMA DE REFERÊNCIA SIRGAS2000 E MERIDIANO CENTRAL 510 W.	81
TABELA 4.5- COORDENADAS DOS PONTOS PARA MEDIÇÃO DAS LINHAS DAS SEÇÕES GEOFÍSICAS	88
TABELA 4.6 - COMPARAÇÃO ENTRE A TEORIA E A INTERPRETAÇÃO DOS ELEMENTOS ARQUITETURAIS ENCONTRADOS NO MORRO PAPALÉO	100

LISTA DE SIGLAS

CMP – Common Mid Point
DOM – Digital Outcrop Model
DXF – Drawing Exchange Format
GNSS - Global Navigation Satellite System
GOCAD - Geological Object Computer Aided Draw
GPR - Ground Penetration Radar
GPS – Global Positioning System
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LASERCA – Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital
LIDAR - Light Detection And Ranging
LST - Laser Scanner 3D Terrestre
MDA - Modelagem Digital de Afloramentos
POAL - Porto Alegre
RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RGB – Red, Green, Blue
RTA – Rough Terrain Antenna
RTK - Real Time Kinematic
SIRGAS-2000 - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000
SMAR - Santa Maria
USB - Universal Serial Bus controllers
UTM - Universal Transversa de Mercator
WGS84 – World Geodetic System 1984

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, HIPÓTESES E OBJETIVOS, REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.1 INTRODUÇÃO

Existem diversas técnicas para se analisar afloramentos, porém, com as novas tecnologias de sensoriamento remoto, teve-se um grande avanço na área da Geologia com a utilização de *Laser Scanner Terrestre (LST)*.

Essa evolução, na área das geociências, permite agregar dados de posicionamento por *GNSS (Global Navigation Satellite System)*, assim como dados de subsuperfície por meio de equipamentos como *GPR (Ground Penetration Radar)* na construção de modelos tridimensionais com *LST*, o que possibilita realizar análises que não seriam possíveis há alguns anos atrás. Mas para isso é necessário compreender, observar, experimentar, testar e avaliar cientificamente a integração dessas diferentes tecnologias, de forma a explorar em sua plenitude os diferentes tipos de dados.

Observa-se que o uso de *LST* tem vantagem na aquisição da face do afloramento, por meio da nuvem de pontos, o que permite executar, em laboratório, a obtenção de medidas de camadas e observações do modelo em três dimensões, quando comparado com os métodos tradicionais, utilizada pelos geólogos em trabalhos de campo, como o uso de bússola, fotografias digitais para montagem de fotomosaico e em medidas de espessuras de camadas com o uso de trena. O *LST* também é uma evolução quando comparado com o uso de outras tecnologias, como a medição com estação total e *GNSS*, utilizados para obtenção de medidas e posicionamento de pontos georreferenciados. Outra informação que pode ser explorada pelo *LST*, e que os equipamentos citados não possuem, é a obtenção da intensidade do sinal emitido pelo equipamento, podendo-se utilizar esse dado em outras análises como classificação de rochas em afloramentos (Kurz *et al.*, 2008; Inocencio *et al.*, 2014).

Na Geologia, o sistema *Laser Scanner Terrestre* vem sendo utilizado em muitos países para Modelagem Digital de Afloramentos (MDA). Pode-se observar nos trabalhos executados por Bellian *et al.* (2002) e Teixeira (2008), que a utilização dessa tecnologia ainda depende da metodologia a ser utilizada no trabalho de campo, bem como das técnicas que envolvem o processamento dos dados, para a obtenção de um bom resultado.

Em trabalhos executados por Teixeira (2008) e Ferrari *et al.* (2012), observa-se que as dificuldades no trabalho de campo, com o uso do *LST*, norteiam a qualidade dos resultados em processos de MDA. Portanto, é necessário que se tenha um controle quanto ao espaçamento dos pontos, bem como a intensidade luminosa no local a ser imageado, para garantir uma boa qualidade no processamento dos dados.

Uma técnica que evoluiu rapidamente foi o georreferenciamento de informações geológicas por meio de Sistemas Globais de Navegação por Satélite - *GNSS*. Tais sistemas vêm permitindo ganhos tanto em exatidão quanto em tempo, quando da integração de diferentes produtos geológicos em um único sistema de referência, garantindo uma integridade nos processos de geração de modelos geológicos tridimensionais (Pringle *et al.*, 2004; Thurmond *et al.*, 2005; White & Jones, 2008).

Os MDAs têm aplicações diversas e sua utilização vem crescendo no cenário mundial, em especial aqueles obtidos com base em *Laser Scanner Terrestre* (Abmayr *et al.*, 2004; Bellian *et al.*, 2005; Buckley *et al.*, 2006). No Brasil, ainda são poucos os estudos que discutem as vantagens, os métodos de trabalho e as aplicações dessa ferramenta (Freire, 2006; Barchik *et al.*, 2007; Wutke & Centeno, 2007; Teixeira, 2008; Centeno *et al.*, 2010; Jacobi *et al.*, 2010; Ferrari *et al.*, 2012; Souza, 2013; Bordin *et al.*, 2013).

Em alguns trabalhos (Teixeira, 2008; Souza, 2013), observou-se que o sistema *LST* permite uma análise da superfície do afloramento, com base na modelagem por meio de outras ferramentas, como o uso do software *GOCAD (Geological Object Computer Aided Draw)*, porém, os dados obtidos nesse modelo fica restrito à superfície externa do afloramento, visto que o *LST* não atinge as partes internas do mesmo, sendo necessário o uso de outras tecnologias como o *GPR (Ground Penetration Radar – Radar de Penetração)* para complementação do modelo, pois com esta tecnologia é possível analisar subsuperfícies, que podem ser interpretadas e modeladas em conjunto com os dados do *LST*.

Segundo Bristow & Jol (2003), o uso de *GPR* em estudos de depósitos de ambientes fluviais, para identificação de deposição em grande escala, como barra em pontal e outros elementos arquiteturais, tem sido muito utilizado para estudos de subsuperfície e que podem ser integrados com dados de superfície.

Os problemas para encontrar metodologias adequadas para um melhor aproveitamento nos processos que envolvem o imageamento de um afloramento e seu processamento são muitos, e que segundo Silva *et al.* (2011), um deles se refere a grande quantidade de dados da nuvem de pontos (*point cloud*), pois é necessário um computador com grande potencial de memória para agilizar o processamento dos dados.

Outra técnica que vem sendo utilizada é a criação de modelos tridimensionais (3D), com base em fotos digitais, por meio da aplicação de modelos de calibração em cenas obtidas com uso de câmeras digitais manuais, para geração de nuvem de pontos (Se & Jasiobedzki, 2006). Estes modelos de calibração para aplicação em foto realidade serão tópicos de muitos anos de pesquisa, que permitirão a criação de modelos 3D, tanto para visualização quanto para medições, com aplicações em diversas áreas do conhecimento. Na Geologia, isto é um novo desafio para exploração na utilização de MDAs.

Para modelagem geológica, a tecnologia mais adequada para capturar dados de um afloramento dependerá de vários fatores, dentre eles, o objeto de estudo, a natureza do afloramento, incluindo quantidade de exposição e acessibilidade, nível de detalhe e precisão espacial necessária e as restrições que envolvem tempo e custo (Jones *et al.*, 2008).

Quanto à precisão e exatidão é preciso compreender o que envolve estes termos, sendo que a exatidão pode ser entendida como o grau de proximidade de uma estimativa com seu parâmetro ou valor verdadeiro (Gemael, 1994) e a precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média ou o grau de requinte no desempenho de uma operação (Oliveira, 1983). Portanto, a exatidão vai refletir a proximidade de uma grandeza estatística ao valor do parâmetro para o qual ela foi estimada, vinculando-se com os efeitos sistemáticos e aleatórios (tendência e dispersão), enquanto que a precisão vai estar relacionada diretamente com a dispersão da distribuição das observações, vinculando-se apenas aos efeitos aleatórios (Gemael, 1994; Monico *et al.*, 2009). Avaliar a exatidão posicional das medidas de distâncias e coordenadas fornecidas por um equipamento *laser scanner* e testar o comportamento do aparelho, quanto à dispersão da nuvem de pontos, é importante para se ter subsídios quanto a qualidade dos dados obtidos (Wutke, 2006).

Executado o controle destes dados, a modelagem geológica poderá ser utilizada como um meio de compreender arquiteturas geológicas e os seus efeitos sobre o comportamento em análogos de rochas-reservatório (Kurz *et al.*, 2008), além de permitir reunir em um mesmo modelo informações de topologia, geometria, propriedades e atributos de objetos geológicos.

A utilização de afloramentos análogos na caracterização de atributos físicos de corpos sedimentares e na definição de modelos geológicos é um procedimento no qual se busca construir, de forma confiável, mas que permita acessar e quantificar os atributos arquiteturais e geométricos dos estratos sedimentares neles encontrados (Paim *et al.*, 2003).

1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.2.1 A Tecnologia Laser Scanner 3D Terrestre – LST

Nos últimos anos o crescimento na aplicação de novas tecnologias vem crescendo em diversas áreas do conhecimento e uma dessas tecnologias se refere ao sistema *LIDAR (Light Detection And Ranging)*. Essa técnica é empregada em equipamentos *Laser Scanner Terrestre (LST)*. O *LST* é um equipamento com tecnologia baseada em um sistema *laser* capaz de medir ângulos verticais, horizontais e distâncias com um alto padrão de precisão do objeto escaneado (Inocencio *et al.*, 2014; Gonçalves, 2007; Ergün, 2011). De acordo com Barchik *et al.* (2007) o sistema *LST* é capaz de capturar algumas centenas de milhões de pontos com coordenadas tridimensionais, obtidos através da emissão e recepção de uma onda eletromagnética. Para gerar essas coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, o equipamento emite pulsos *laser* com o auxílio de um espelho de varredura (Inocencio *et al.*, 2014; Gonçalves, 2007; Ergün, 2011). Estes pulsos atingem os objetos, e parte desta energia, retorna para o sistema, permitindo medir a distância entre o sensor e um dado objeto (Figura 1.1).

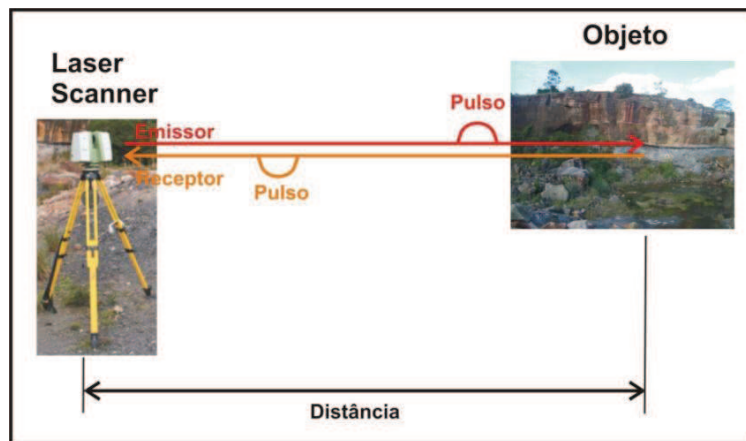


Figura 1.1 - Caminho dos sinais (pulso) transmitidos e recebidos por um equipamento *Laser Scanner Terrestre* (adaptado de Heritage & Large, 2009)

O sistema *LST* pode utilizar dois tipos de técnica de medição de distância, que podem ser obtidas pelo tempo de voo ou tempo de retorno do sinal e pela diferença de fase. Para avaliar os erros lineares ou de distâncias, pode-se comparar a distância obtida pelo *LST* com métodos tradicionais, como por exemplo, estações totais. Esse método de avaliação da exatidão linear pode ser aplicado em equipamentos cujo princípio de funcionamento para o cálculo de distância seja o método “*time-of-flight*” (tempo de voo) ou o método da diferença de fase entre o sinal de partida e chegada do pulso laser (Wutke, 2006; Silva *et al.*, 2013).

O tempo de voo (*time of flight* (TOF) – Figura 1.2), se baseia na medição do tempo de trânsito do *laser* a partir do emissor, refletindo no objeto escaneado e retornando até o receptor (Figura 1.1). Esta técnica permite que o retorno do *laser* possa ser controlado e sejam armazenados vários retornos a partir de um único pulso. Para cada giro horizontal e/ou vertical, calculado em função da resolução requerida, é emitido um pulso onde tem-se o tempo medido e, conseqüentemente, a distância determinada pela velocidade conhecida do *laser*. Estes equipamentos são muito utilizados para topografia, onde a maior distância alcançada, de até 1700 metros em relação ao objeto, o que permite ganho na produtividade, mas a precisão das coordenadas chega a alguns centímetros por causa da precisão angular. Nesse caso a distância é obtida pela expressão (1):

$$D = (1/2).c.\Delta t \quad (1)$$

onde:

D é a distância do sensor ao objeto;

c é a velocidade da luz; e,

Δt é o tempo de ida e volta do pulso *laser*.

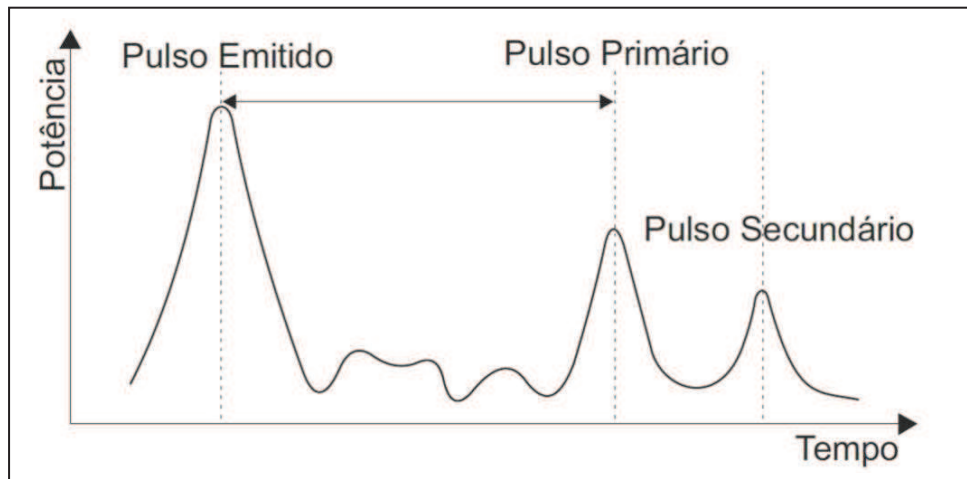


Figura 1.2 – Funcionamento do pulso pelo tempo de voo (TOF) – Inocencio *et al.*, 2014

A diferença de fase (*phase shift*) é uma técnica em que o *laser* emite, de forma contínua, um feixe com uma onda harmônica (figura 1.3) e, através da diferença se calcula a distância por meio da comparação entre a onda emitida e recebida.

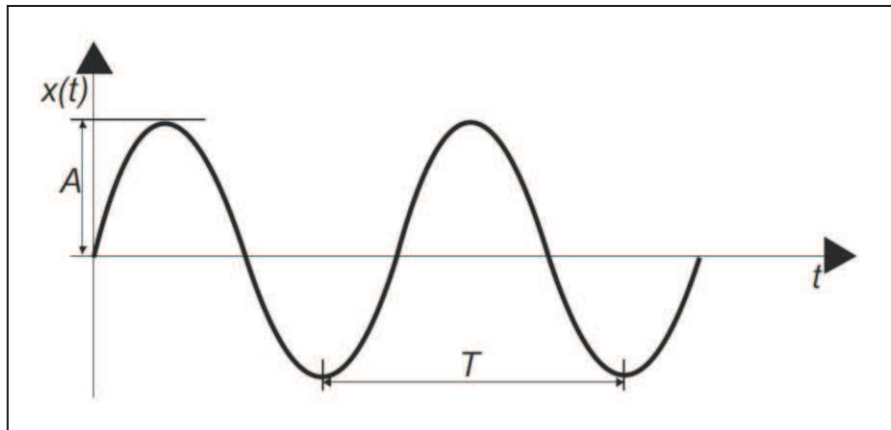


Figura 1.3 – Funcionamento pela diferença de fase – Inocencio *et al.*, 2014

Portanto, a distância obtida pela diferença de fase pode ser calculada pela expressão (2):

$$A(x,t) = A_0 \exp(-\alpha x) \cdot \exp[i\omega((t-x)/v)] \quad (2)$$

onde:

$A(x,t)$ é o valor do campo elétrico na posição x e no instante t ;

x é a direção de propagação;

$A_0 = A(0,0)$;

α é o coeficiente de atenuação;

$i = \sqrt{-1}$;

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular; e,

v é a velocidade de fase da onda.

Para se trabalhar com *LST* é importante saber para quais fins se vai utilizá-lo, pois existem diversos modelos no mercado, e algumas características são importantes para se entender qual equipamento será adequado em determinado trabalho. Existem alguns equipamentos que podem escanear o objeto de estudo, com uma distância de até 1700 metros em relação ao sensor, porém, para distâncias curtas, pode-se chegar até um 1 metro de distância. Em alguns casos o equipamento pode gerar deslocamento (paralaxe) no objeto escaneado quando se trabalha com distâncias curtas menores do que 20 metros, mesmo que no manual informe que a distância mínima seja menor.

O problema de paralaxe está associado ao deslocamento da nuvem de pontos em relação à imagem (foto) obtida com o *LST*, pois a resolução relativamente baixa da câmera fotográfica acoplada ao equipamento pode ter influência nesse resultado (Ferrari *et al.*, 2012). O *LST* (ILRIS 3D – técnica de medição por tempo de voo) utilizado no escaneamento do afloramento Pedra Pintada, localizado no município de Caçapava do Sul-RS, não apresentou esse problema, quando foi utilizado distâncias maiores que 60 metros (Ferrari *et al.*, 2012).

Assim, é importante compreender esses parâmetros, visto que o problema de paralaxe pode não acontecer em outros modelos devidos as suas características técnicas, como foi verificado ao se utilizar o sistema *Leica Scann Station C10* (técnica de medição por tempo de voo), no imageamento do afloramento Morro Papaléo (material de estudo dessa tese), onde se trabalhou com distâncias curtas, em torno de 12 metros.

Os equipamentos citados possuem as especificações técnicas, que podem ser observadas na Tabela 1.1, onde observa-se que o alcance mínimo informado pelo fabricante é menor do que o problema analisado por Ferrari *et al.* (2012), o que pode influenciar na análise de posicionamento da nuvem de pontos.

Tabela 1.1 - Especificações técnicas dos *LST*

EQUIPAMENTOS ESPECIFICAÇÕES	LEICA SCAN STATION C10	ILRIS 3D
		
ACURÁCIA DE ALCANCE	6 mm	7 mm
ACURÁCIA DE POSIÇÃO	4 mm	8 mm
ALCANCE MÍNIMO	0,10 m	3 m
ALCANCE MÁXIMO	300 m	1700 m
TAXA DE MEDIÇÃO	50.000 pontos/segundo	10.000 pontos/segundo

CAMPO DA VISÃO	360° X 270°	40° X 40°
FREQUÊNCIA	2 KHz	2 KHz
COMPRIMENTO DE ONDA (λ)	532 nm	1500 nm
CÂMERA DIGITAL	4 MP	6.6 MP
PESO DO LST	13 kg	13 kg
DURAÇÃO DA BATERIA	3,5 h (interna) 6 h (externa)	3 h (interna)

Fonte: http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-C10_79411.htm

No Brasil, nas áreas de Engenharia, Cartografia e Arquitetura, o *LST* vem sendo utilizado, para se modelar túneis (Gonçalves, 2007), para mapeamento topográfico (Rivas e Brito, 2003) para avaliação de posicionamento com diversos formatos de alvos (Wutke, 2006), para aplicação em ciências florestais (Bordin *et al.*, 2013), para mapeamento de mina a céu aberto para cálculo de volume (Barchik *et al.*, 2007), para modelagem digital de afloramento (Ferrari *et al.*, 2012; Souza, 2013), classificação de rochas (Inocencio *et al.*, 2014) e em aplicações de sistemas de varredura para levantamento 3D (Tomasselli, 2003).

O uso da tecnologia *LST*, em estudos de afloramentos, vem se expandindo em função da facilidade na aquisição de dados georreferenciados de forma precisa, rápida e automatizada. Sua utilização para esse fim começou há cerca de uma década (Bellian *et al.*, 2002), mas somente nos últimos anos o número de artigos científicos aumentou significativamente.

Os temas de interesse são variados, com destaque para as abordagens metodológicas, onde Buckley *et al.* (2006) combinam as metodologias de dados de fotogrametria com dados de *LST* para modelagem digital de afloramento. Em Abmayr *et al.* (2004), trabalhou-se com uma metodologia para reconstrução de modelos 3D através da combinação dos dados do *LST* com dados *RGB* (*Red, Green, Blue*) obtidos com uma câmera fotográfica de alta resolução, podendo ser aplicada em diversas áreas.

Em Bellian *et al.* (2005), pode-se observar a metodologia utilizada para modelagem digital de afloramento para aplicação estratigráfica, porém, observou-se a necessidade de utilizar outras ferramentas de realidade virtual para se trabalhar com a grande quantidade de nuvem de pontos advindas do *LST* ao se gerar a triangulação (*mesh*) na modelagem da superfície.

Observa-se que é necessário calibrar o modelo obtido de um afloramento, utilizando-se dados de *LST*, com medidas reais de propriedades geológicas, para se testar a validade do mesmo (Jones *et al.*, 2008). As observações diretas em afloramentos bem expostos podem ajudar a reduzir parte das dúvidas, que porventura, aparecem durante as interpretações geológicas. Isso pode, posteriormente, ser integrada aos dados advindos de outras metodologias como aquisição geofísica, com o uso de *GPR* (*Ground Penetration Radar*).

1.2.2 A Tecnologia GPR (Ground Penetration Radar)

Cada vez mais as Geociências utilizam técnicas digitais de coleta de dados espaciais georreferenciados, unindo maior exatidão posicional com maior resolução espacial e possibilitando análises quantitativas mais detalhadas (Buckley *et al.*, 2008). O uso de método geofísico, como o radar de penetração de solo (*GPR*), possibilita a obtenção de um conjunto de dados de alta resolução de subperfícies rasas de afloramentos (Neto, 2006; Akinpelu, 2010).

O *GPR* é um método geofísico de imageamento, que se diferencia da sísmica, por utilizar ondas eletromagnéticas (Neal, 2004) na faixa de altas frequências, de 10 a 1000 MHz (ondas de rádio), com comprimentos de onda variando de 30 centímetros a 30 metros, irradiadas por uma antena emissora colocada na superfície, utilizado para estudo de estruturas em subsuperfície.

O *GPR* fundamenta-se basicamente na transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas por meio de refletores (Figura 1.4). Os refletores, obtidos por ondas eletromagnéticas, caracterizam mudanças de

propriedades elétricas, que após processadas no equipamento, produzem imagens denominadas radargramas (Figura 1.5 e Figura 1.6) que possibilitam interpretações das formas e dos materiais subjacentes.

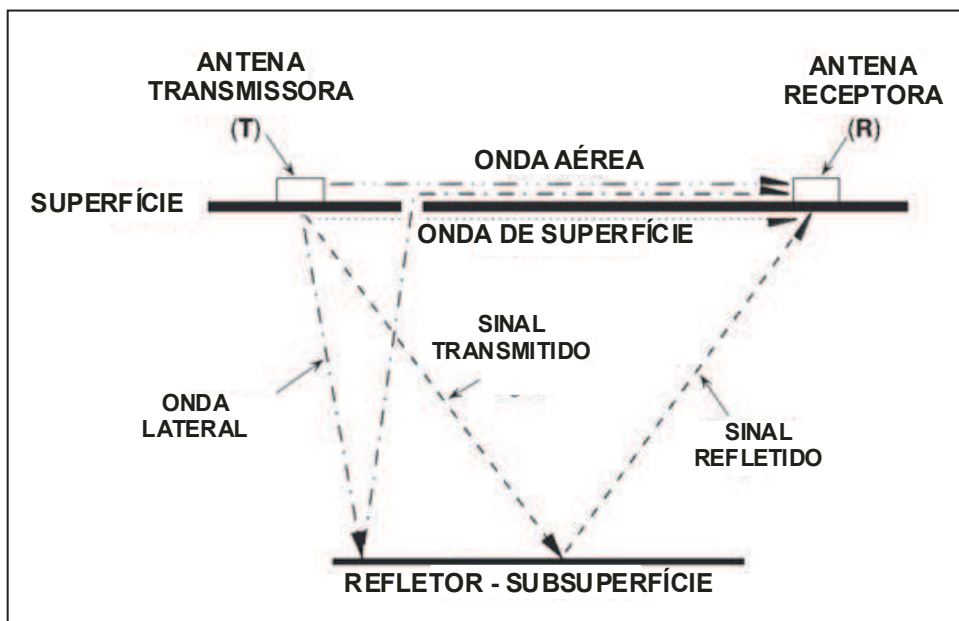


Figura 1.4 - Caminho dos sinais transmitidos e recebidos por uma antena *GPR* (adaptado de Neal, 2004).

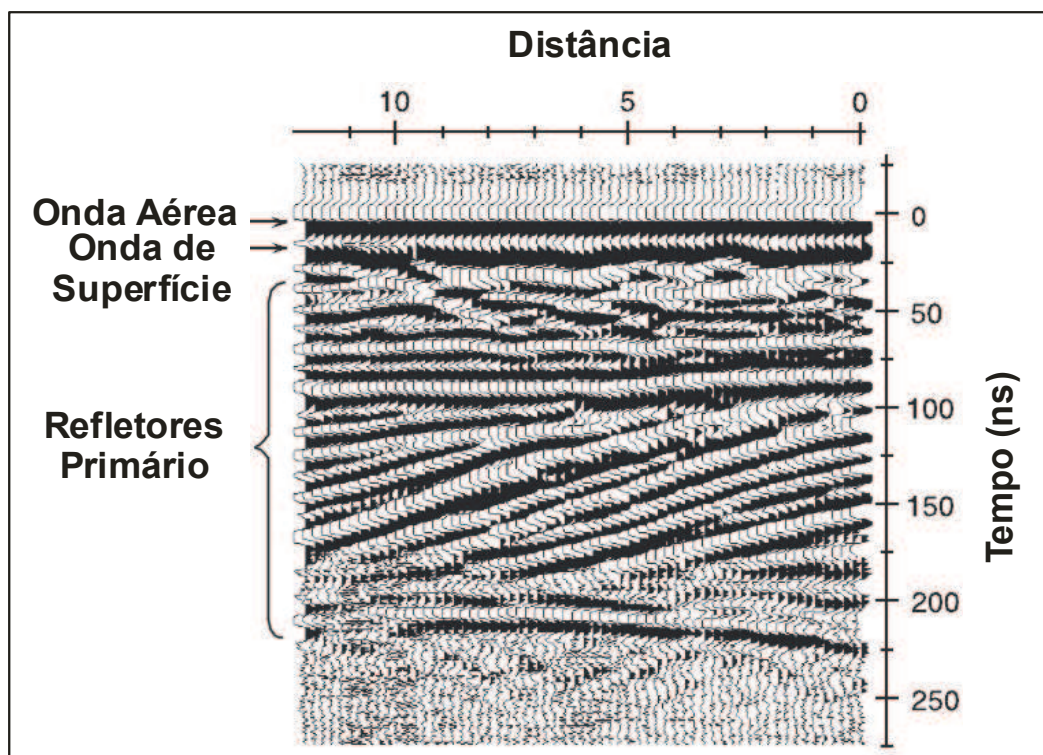


Figura 1.5 – Radargrama com o resultado da reflexão dos traços individuais obtidos da antena *GPR*, indicando onda aérea, onda de superfície e refletores primário (adaptado de Neal, 2004).

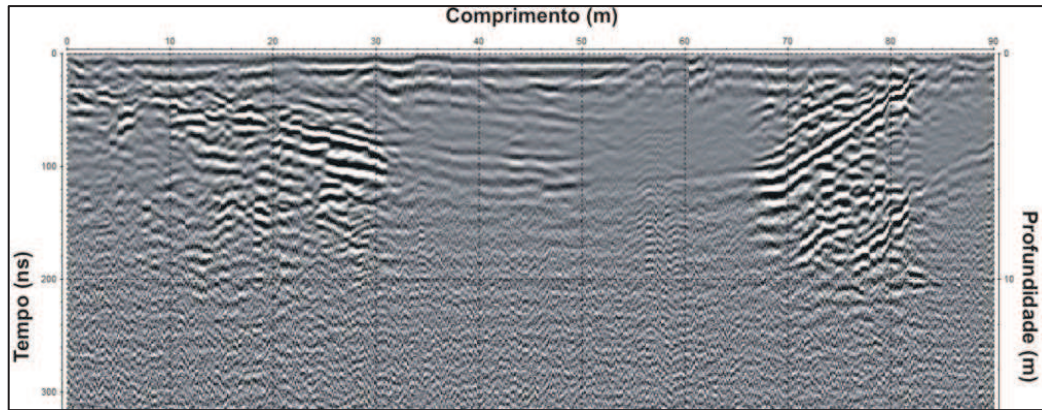


Figura 1.6 - Radargrama do Morro Papaléo – Antena de 100 MHz – Seção N4-N1.

As equações de Maxwell descrevem a propagação da onda eletromagnética por meio da interação entre os campos elétricos e magnéticos (Annan, 2001). Para determinar a resposta de um material à presença de um campo, as equações de Maxwell necessitam de parâmetros das propriedades físicas do material. Esses parâmetros descrevem a capacidade das cargas se movimentarem e de armazenar energia. São chamadas de equações constitutivas as relações entre essas propriedades e seus campos elétricos e magnéticos e, segundo Olhoeft (1998), essas relações são lineares no estudo do *GPR*.

As propriedades físicas que controlam, em um meio, o comportamento das energias eletromagnéticas, conforme Neal (2004) são: a permissividade dielétrica, a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética. Neste contexto, as propriedades devem ser consideradas como as medidas das respostas de um material a um campo elétrico aplicado ou a um campo magnético aplicado (Powers, 1997). Segundo Annan (2001), as propriedades físicas de alguns materiais têm as seguintes características (Tabela 1.2):

Tabela 1.2 - Propriedades físicas de alguns materiais.

Material	Constante Dielétrica	Condutividade	Velocidade	Atenuação (α)
	(K)	(mS/m)	(m/ns)	(dB/m)
Ar	1	0	0.3	0
Água destilada	80	0.01	0.033	0.002
Água doce	80	0.5	0.033	0.1
Água salgada	80	3000	0.01	1000
Areia seca	3 a 5	0.01	0.15	0.01
Areia saturada	20 a 30	0.1 a 1	0.06	0.03 a 0.3
Calcário	4 a 8	0.5 a 2	0.12	0.4 a 1
Folhelhos	5 a 15	1 a 1000	0.09	1 a 1000
Siltito	5 a 30	1 a 1000	0.07	1 a 1000
Argila	5 a 40	2 a 1000	0.06	1 a 300
Granito	4 a 6	0.01 a 1	0.13	0.01 a 1
Sal	5 a 6	0.01 a 1	0.13	0.01 a 1
Gelo	3 a 4	0.01	0.16	0.01

Fonte: Annan, 2001

Quando um campo elétrico alternado é aplicado às cargas elétricas confinadas, observa-se que elas não são capazes de se deslocar livremente, pois sofrem a ação de uma força para se deslocarem o máximo possível. Assim, as órbitas dos elétrons passarão de circular para elíptica (polarização eletrônica), as moléculas terão ligeira distorção de cargas (polarização molecular), as moléculas dipolares com carga neutra

na rede giram em alinhamento (polarização orientacional) e ocorre acumulação de íons nas interfaces (polarização das interfaces) (Powers, 1997).

A permissividade dielétrica é a capacidade que um material possui de armazenar energia. O armazenamento de cargas elétricas é determinado pelo processo de polarização, expresso por:

$$D = \epsilon.E \quad (3)$$

Onde:

ϵ é a permissividade dielétrica [Farad/m];

D é a densidade de fluxo elétrico [Coulomb/m²], algumas vezes chamado de deslocamento dielétrico;

e,

E é o campo elétrico [Volts/m].

A energia elétrica armazenada durante cada ciclo determina o valor da permissividade real para aquela frequência (Powers, 1997). Assim, quando a frequência do campo elétrico aumenta, mais rápida será a reversão da polaridade do campo elétrico, mas algumas cargas confinadas podem não conseguir realizar todo seu deslocamento antes da reversão da direção. Essa é a permissividade dielétrica real que diminui quando a frequência do campo elétrico aumenta.

A energia do campo elétrico perdida no deslocamento determina a permissividade dielétrica imaginária daquela frequência. A quantidade da energia do campo elétrico perdida no deslocamento das cargas pode ser considerada insignificante para baixas frequências, no entanto, é muito alta nas altas frequências. O pico das perdas por relação dielétrica, ou permissividade dielétrica imaginária, ocorre quando o processo de deslocamento das cargas realizar-se-á durante todo o tempo de um ciclo (frequência de ressonância associada com o processo de deslocamento de cada carga) (Powers, 1997).

A componente real é normalmente expressa pela permissividade dielétrica relativa – razão entre a capacidade de armazenar cargas do material e a permissividade do vácuo. A unidade de permissividade dielétrica é a capacitância em Farads por metro e a permissividade dielétrica do vácuo é igual a $8,854 \times 10^{-12} F/m$. Perdas dielétricas são desprezíveis se a condutividade do material for baixa, menor do que ~ 10 miliSiemens/metro (mS/m), que corresponde a diversos materiais geológicos (Martinez & Byrnes, 2001).

A permeabilidade magnética é a capacidade de magnetização de um material na presença de um campo magnético. Assim o armazenamento e dissipação das propriedades magnéticas em um material são descritas pela relação:

$$B = \mu.H \quad (4)$$

onde:

H é o campo magnético [Amper/m];

B é o campo de indução magnética [Tesla]; e,

μ é a permeabilidade magnética [Henry/m].

Esta propriedade é desprezível na maioria dos materiais sedimentares, conforme Martinez & Byrnes (2001). Na maioria das condições geológicas, as variações magnéticas são muito pequenas, assim, a permeabilidade magnética dos materiais quase não varia com relação à permeabilidade do espaço livre ($\mu \approx \mu_0$), portanto, as propriedades que são consideradas no GPR são as propriedades elétricas.

A permeabilidade relativa é o produto da permeabilidade magnética do material e a permeabilidade magnética do vácuo. O valor da permeabilidade magnética do vácuo é $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/m. O valor da permeabilidade relativa da maioria dos materiais sedimentares é $\mu_r = 1$.

A condutividade elétrica, segundo Powers (1997), é definida como a medida do transporte de carga através de um material, resultado da aplicação de um campo elétrico estático. No momento em que um campo elétrico é aplicado ocorrem deslocamentos de cargas a cada meio ciclo devido à condutividade estática básica do material. Assim, o deslocamento das cargas dependerá do processo de polarização, de acordo com as características de cada material. Portanto, a propriedade física dos materiais de subsuperfície pode agir na atenuação das ondas eletromagnéticas, mas que pode ser quantificada, na prática, através da constante de atenuação α (tabela 1.2), segundo a equação (Davis & Annan, 1989):

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma}{\sqrt{K}} \quad (5)$$

onde:

α é a constante de atenuação em [dB/m];

σ é a condutividade elétrica [Siemens/m]; e,

K é a constante dielétrica.

Segundo Olhoeft (1998), o transporte de cargas descrito pela condutividade elétrica é expresso pela lei de Ohm como:

$$J = \sigma.E \quad (6)$$

Onde:

E é o campo elétrico aplicado [Volts/m];

σ é a condutividade elétrica [Siemens/m]; e,

J é a densidade de corrente [Amper/m²].

Permissividade dielétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética são dependentes da frequência, possuem comportamentos diferentes em diferentes intervalos de frequência. A constante dielétrica, geralmente diminui com o aumento da frequência, de outra forma a condutividade elétrica e as perdas dielétricas aumentam com o aumento da frequência. No entanto, essas propriedades são relativamente coerentes nas frequências de alcance das antenas do *GPR*, entre 25MHz até 1,5 GHz (Martinez & Byrnes, 2001).

A velocidade (v) com a qual a onda eletromagnética irá se propagar em um determinado material vai depender da constante dielétrica da seguinte maneira:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \Rightarrow \frac{V}{C} = \frac{1/\sqrt{\mu\epsilon}}{1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \Rightarrow V = \frac{C}{\sqrt{K}} \quad (7)$$

Onde:

μ é a permeabilidade magnética [H/m];

ϵ é a permissividade dielétrica [Farad/m];

K é a constante dielétrica; e,

C é a velocidade da luz [m/s].

A constante dielétrica de solos e rochas, em geral, é fortemente influenciada pela presença de água. A água apresenta elevado valor da constante dielétrica ($K = 80$ – Tabela 1.2) se comparado com a do calcário ($K = 4 - 8$ – Tabela 1.2) que constitui a matriz de uma litologia, assim como a do ar ($K = 1$ – Tabela 1.2) que pode preencher os vazios desta.

A profundidade de penetração é uma das principais limitações do método GPR, pois ela deve ser analisada quando se pretende executar uma investigação Geofísica. Para Reynolds (1997), a profundidade em que o sinal atenua tem um valor inicial de aproximadamente 37% e é conhecido como *skin depth* (δ), inversamente proporcional à atenuação. Para materiais que apresentam elevadas condutividades elétricas, tem-se um valor baixo do δ . Portanto, para valores baixos de condutividade elétrica tem-se um aumento do δ , que proporciona uma maior penetração. Assim, a profundidade de penetração do GPR dependerá da frequência da antena a ser utilizada (Porsani, 2011), pois quanto menor a frequência maior será a profundidade de penetração e menor será a resolução teórica (Tabela 1.3).

Tabela 1.3 - Frequência, profundidade de penetração e resolução teórica.

Frequência (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)	Resolução Teórica (m)
200	4	0,125 a 0,250
100	25	0,250 a 0,500
50	30	0,500 a 1

Fonte: Porsani (2011)

Quanto às outras especificações das antenas GPR existem dois tipos, que são as antenas blindada (*Shielded* - Figura 1.7) e não blindada (*Snake* – Figura 1.8). As antenas blindadas diminuem interferências externas que podem ser provocadas pela presença de cerca metálica, tanques de armazenamento metálico entre outros no entorno da seção a ser imageada. Para se utilizar as antenas denominadas *Shielded* (blindada), necessita-se de um carrinho para apoiar o equipamento ao se executar o imageamento de uma seção GPR, porém, em terrenos acidentados tem-se uma dificuldade para percorrer o alinhamento da seção. Em terrenos acidentados, pode-se utilizar antenas denominadas *Snake* (*RTA - Rough Terrain Antenna*), porém, essas antenas não são blindadas, podendo sofrer interferências externas com a presença de objetos metálicos, como por exemplo uma cerca metálica. Para se utilizar as antenas denominadas *Snake* (não blindada) é necessário acoplar o cabo da antena na mochila onde se encontra o equipamento, que fica apoiado nas costas do operador (Figura 1.9), pois conforme a sua forma ao se deslocar na superfície ela acompanha o relevo do terreno.

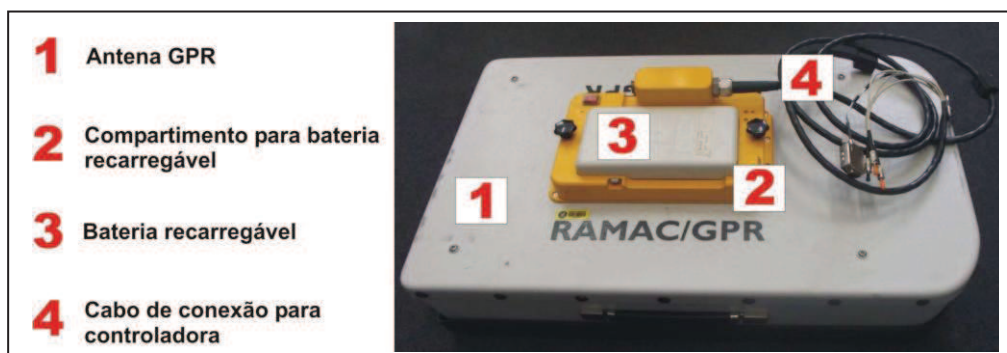


Figura 1.7 - Antena blindada - *Shielded*



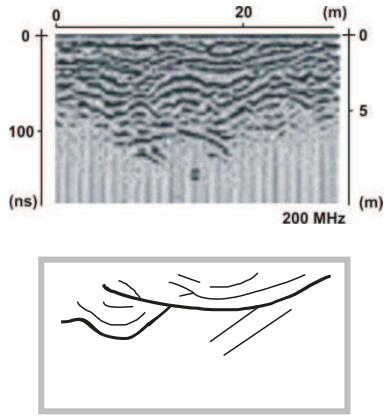
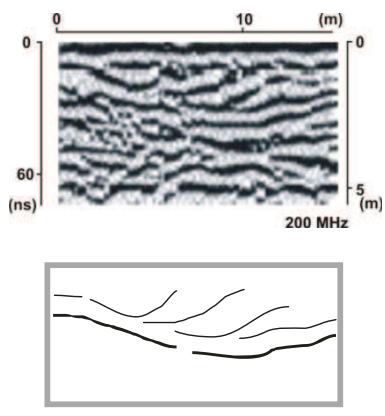
Figura 1.8 - Antena não blindada - *Snake*



Figura 1.9 – Aquisição de dados *GPR* no Morro Papaléo com o uso de uma antena *Snake*

Na Tabela 1.4, observam-se algumas características importantes no comportamento do radargrama, onde, em rios entrelaçados, a amplitude e a continuidade de reflexão são baixas, mas quanto à configuração da reflexão ela pode ser ondulada descontínua, progradante ou em forma de calha e apresentar difrações, aparecendo como preenchimento de canal ou calhas na sua unidade de fácies. Para os rios meandrantés, a amplitude e a continuidade de reflexão também são baixas e na configuração da reflexão apresenta-se em forma de sigmóide o que caracteriza barra em pontal na sua forma externa ou unidade de fácies.

Tabela 1.4 - Amplitude, continuidade, configuração e forma externa em ambiente fluvial (adaptado de Akinpelu, 2010).

Ambiente Fluvial	Amplitude de Reflexão	Continuidade da Reflexão	Configuração da Reflexão	Forma externa (geometria) da unidade de fácies
Rios entrelaçados (<i>braided rivers</i>) 	Baixa	Baixa	Ondulado, descontínuo; Progradante ou em forma de calha;	Preenchimento de Canal ou Calhas
Rios meandrantess (<i>meandering rivers</i>) 	Baixa	Baixa	Sigmóide	Preenchimento de um canal (Barra em pontal)

No Morro Papaléo, área de estudo deste trabalho, pode-se observar, no radargrama da antena de 100 MHz, a forma de canal (Figura 1.10 e Figura 1.11), conforme informações do ambiente fluvial (Tabela 1.4) apresentada por Akinpelu (2010).

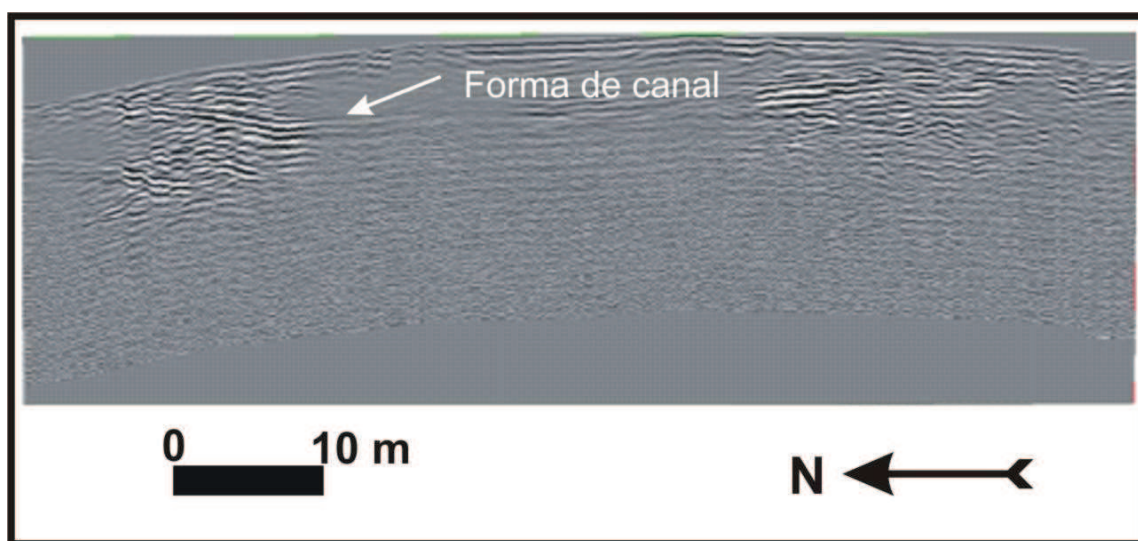


Figura 1.10 - Radargrama – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.

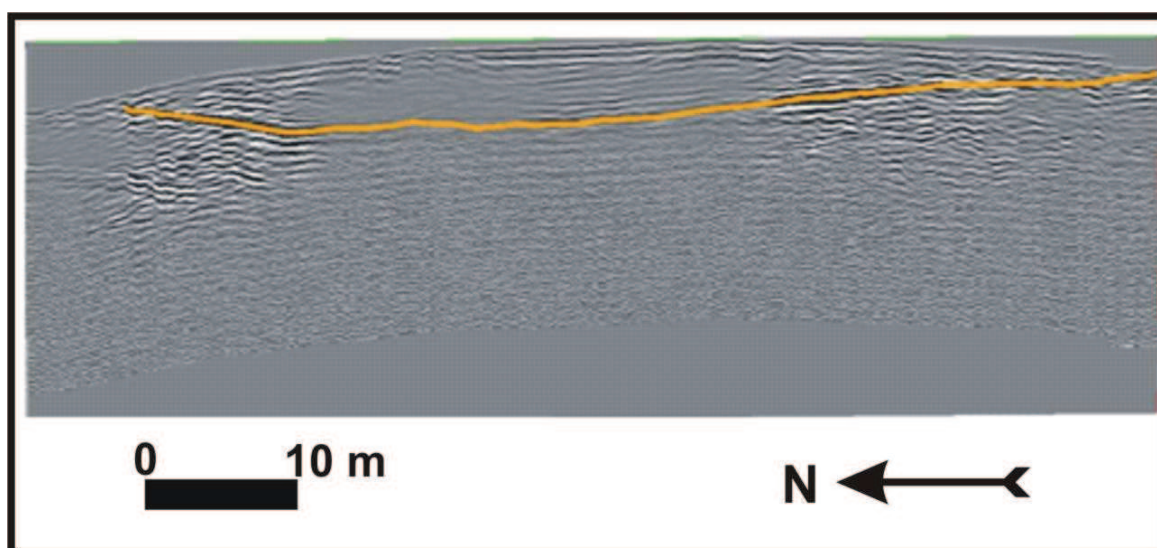


Figura 1.11 - Radargrama Interpretado – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.

A geometria em forma de canal observada na Tabela 1.4 aparece no trabalho de Menezes (2004), onde se identificam no radargrama (Figura 1.12), diversos canais amalgamados interpretados nos perfis, cujos refletores aparecem levemente inclinados ou côncavos.

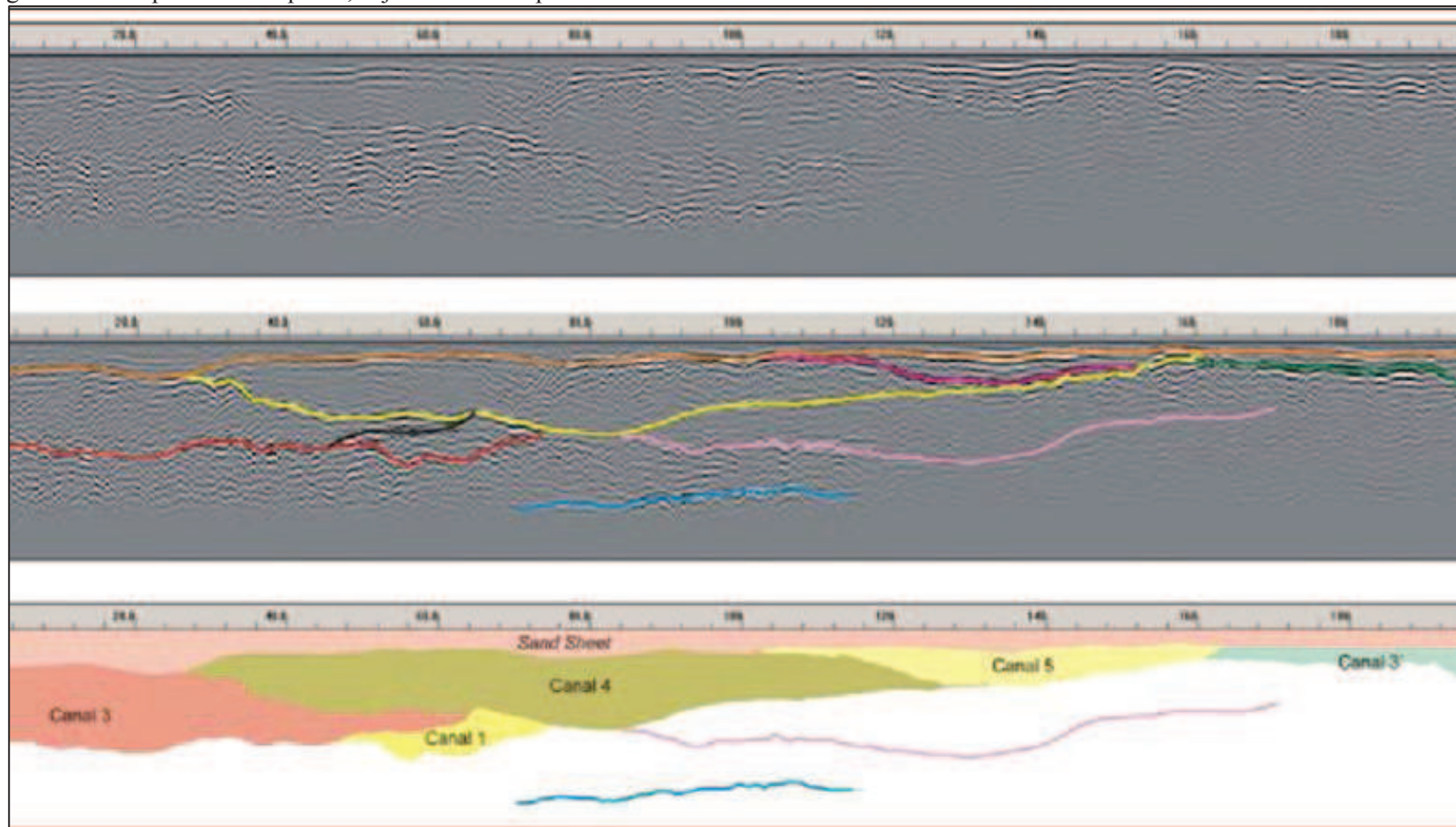


Figura 1.12 - Radargrama interpretado com identificação de canais amalgamados (adaptado de Menezes, 2004).

Com os dados obtidos da antena de 100 MHz, observa-se no radargrama do Morro Papaléo, outra geometria apresentada (barra em pontal – Figura 1.13 e Figura 1.14), com estratos cruzados simples limitados por superfícies inclinadas a favor do fluxo (Tabela 1.4).

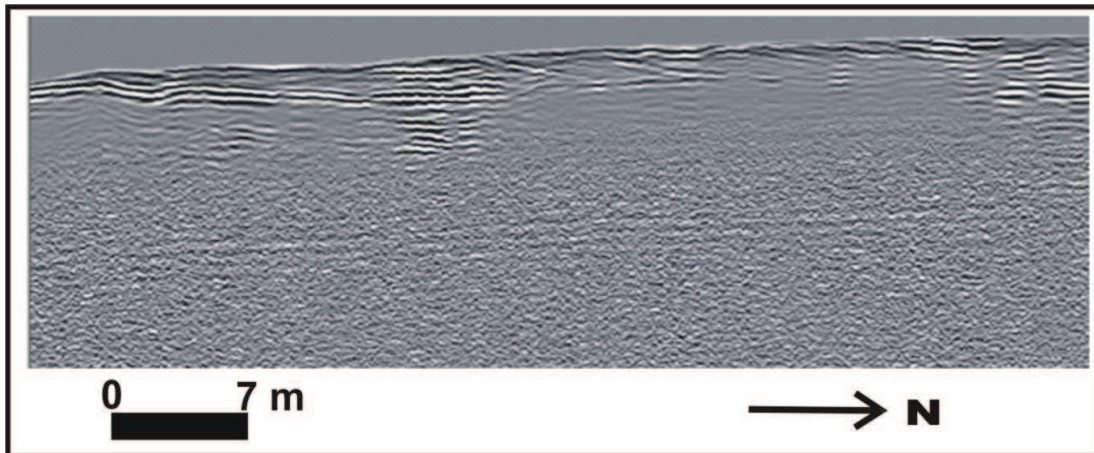


Figura 1.13 - Radargrama – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.

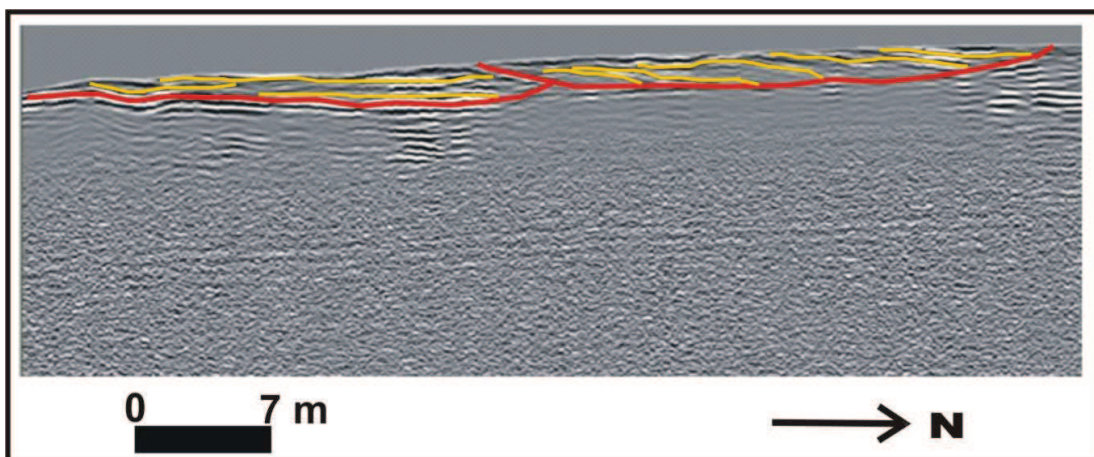


Figura 1.14 - Radargrama Interpretado – Antena de 100 MHz – Morro Papaléo.

1.2.3 A Modelagem Geológica

Segundo Teixeira e Christofolletti (1997), a modelagem consiste em uma metodologia estruturada para construção de modelos, e se baseia em técnicas padronizadas, geralmente complexas. Quanto ao modelo gerado, pode-se definir como a representação simplificada de uma entidade física, de uma estrutura, de um processo ou de um fenômeno, visando permitir a análise do seu comportamento em situações específicas.

Do ponto de vista geológico, a modelagem consiste em utilizar metodologias estruturadas de dados para a elaboração de superfícies tridimensionais que permita a visualização, interpretação e análise de estruturas geológicas, de modo a se obter medições confiáveis no modelo gerado.

A aplicação de novas tecnologias voltadas para modelagem vem crescendo em todas as áreas do conhecimento, e a Geologia é uma das que estão sendo beneficiadas com seu uso, que vem agregando resultados inovadores aos trabalhos de campo.

Especificamente em Modelagem Digital de Afloramentos (MDA), as pesquisas ainda são incipientes, necessitando do aprimoramento da técnica, principalmente no que tange ao processamento, integração e manipulação de dados. Isso pode ser comprovado em Teixeira (2008), que teve dificuldade ao integrar a

nuvem de pontos do *LST* para modelagem no software *GOCAD*, pois o mesmo teve que ser reduzido de um total de 7.139.764 pontos para 700.000 pontos.

As técnicas tradicionais para MDA baseiam-se em atividades de campo, como visualização e descrição *in loco*, raspagem do afloramento com o uso de ferramentas de corte e obtenção de amostras. Em alguns casos é necessário o uso de trena (Figura 1.15), para se fazer a medição das camadas do afloramento, com uma precisão visual, devido a incerteza na visualização dos números na trena.

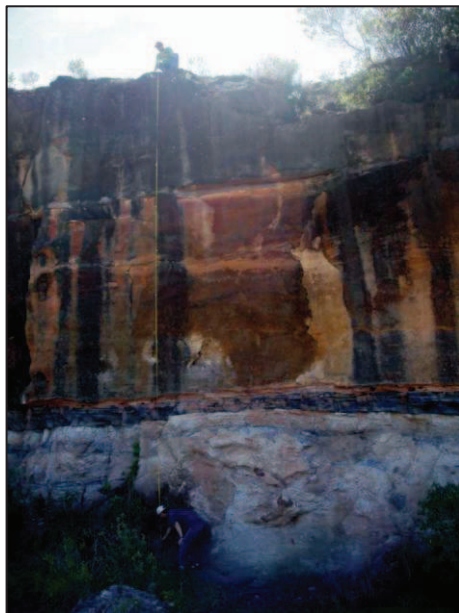


Figura 1.15 – Medição de camadas do afloramento com o uso de trena - método tradicional

Segundo Rotevatn *et al.* (2009), a utilização do *LST* para MDA tem sido introduzida recentemente em trabalhos de campo para estudos geológicos e ainda existem metodologias a serem definidas, devido ao curto espaço de tempo de uso dessa ferramenta, que vem ganhando popularidade entre os geocientistas. Quanto ao *laser scanner* aerotransportado é um método eficiente na obtenção de medidas com alta-resolução, possibilitando observar no modelo gerado os níveis de contraste, o que facilita o processo de interpretação geológica (Baltsavias *et al.*, 2001).

Segundo Bellian *et al.* (2005), a utilização do sistema *LST* permite a construção de um MDA onde pode-se adicionar atributos como cor, intensidade do laser entre outros, possibilitando ao geólogo interpretar várias informações e realizar medições precisas do afloramento. Em termos de modelagem, os autores encontraram problemas na manipulação do grande volume de dados, sendo obrigados a diminuir a resolução da nuvem de pontos.

Para Zahm & Hennings (2009), a técnica *LIDAR* vem sendo utilizado na modelagem tridimensional de afloramentos para a detecção de fraturas e na delimitação de limites de camadas. Comparando-se esta técnica com o uso de fotointerpretação, observam-se algumas limitações no que se refere às distorções da foto, devido ao seu processo ser obtido por avião. Quanto à técnica *LIDAR*, permite um nível de detalhamento maior em relação às fotos aéreas, o que permite uma caracterização confiável das fraturas.

De acordo com Loseth *et al.* (2007), os métodos tradicionais, usados em MDA, podem acarretar erros, principalmente em afloramentos com dificuldades de acesso, distorcendo observações ao correlacioná-las com dados geológicos. Porém, a combinação de novas tecnologias pode ser integrada às medições de campo (Bellian *et al.*, 2005) e este procedimento pode auxiliar na interpretação e análise das informações obtidas.

Para a junção das cenas imageadas com o produto do *LST* são utilizadas superfícies comuns e para isso, há a necessidade de desenvolver algoritmos sofisticados que auxiliam na hora da sobreposição entre as nuvens de pontos (Buckley *et al.* 2008).

Para a medição e classificação das características geológicas do afloramento, advindas do *LST*, é necessária a combinação de ferramentas como aplicativos de manipulação de dados 3D (Fabuel-Perez *et al.*, 2009) e de classificação de informações do MDA, que facilitam a visualização e interpretação de um modelo geológico. Assim Bellian *et al.* (2005) e Fabuel-Perez *et al.* (2009) enfatizam que é importante a combinação

do tradicional trabalho de campo (interpretação de geometria, litologia, tamanho dos grãos, estrutura sedimentar e informações de paleocorrente) com os dados que serão analisados na nuvem de pontos do *LST*.

A interpretação de fácies no MDA, em alguns casos, pode ser dificultada, devido ao fato de que a resposta visual das informações muitas vezes acaba sendo mascarada por fatores diversos, e nesse caso, o trabalho de campo é imprescindível para auxiliar na identificação de detalhes que não podem ser observados no MDA (Fabuel-Perez *et al.*, 2009).

Pesquisas na área de modelagem de corpos geológicos utilizando produtos advindos da técnica *LIDAR*, vêm favorecendo a interpretação de dados geológicos, como a obtenção da geometria e orientação de camadas em locais inacessíveis, além da obtenção de informação pela intensidade do sinal (Bellian *et al.*, 2005).

A utilização dessa tecnologia pode ser integrada a dados geofísicos e a outras técnicas de visualização 3D, permitindo uma interpretação mais detalhada em afloramentos.

1.3 CONCEITOS SOBRE SISTEMAS FLUVIAIS

É importante compreender os conceitos que envolvem os sistemas fluviais, visto que os dados adquiridos do afloramento, objeto deste estudo, estão associados a estes sistemas. Sendo assim, este item tem como objetivo abordar o embasamento conceitual que será utilizado para a identificação e interpretação dos dados obtidos no afloramento, com o uso de equipamentos como o *LST* e *GPR*.

1.3.1 Processos Fluviais

A morfologia aluvial é o resultado de uma complexa interação entre processos erosivos e deposicionais. Segundo Miall (1996) a relação entre estes processos configura as características gerais do sistema fluvial, como feições de canal, dique marginal, barra, barra de meandro, planície de inundação etc..

1.3.2 O Processo Erosivo Fluvial

No sistema fluvial os processos erosivos estão associados à dinâmica dos canais fluviais, que podem ser classificados em dois tipos: incisão e migração lateral. Por incisão, entende-se uma erosão vertical do substrato que gera um aprofundamento do canal, que pode estar associada a fenômenos autogênicos (sedimentar) ou alogênicos (tectônico). Por migração lateral (Figura 1.16) entende-se uma erosão contínua que ocorre em canais com alta sinuosidade (meandriforme), cuja taxa de erosão está relacionada diretamente à coesividade das margens.

Os fenômenos autogênicos são atuantes em escalas de sistemas deposicionais como, por exemplo, avulsão de canais fluviais (Casagrande, 2010). Já os fenômenos alogênicos estão relacionados ao fluxo de energia dos ambientes e também com a acomodação do sistema em função.

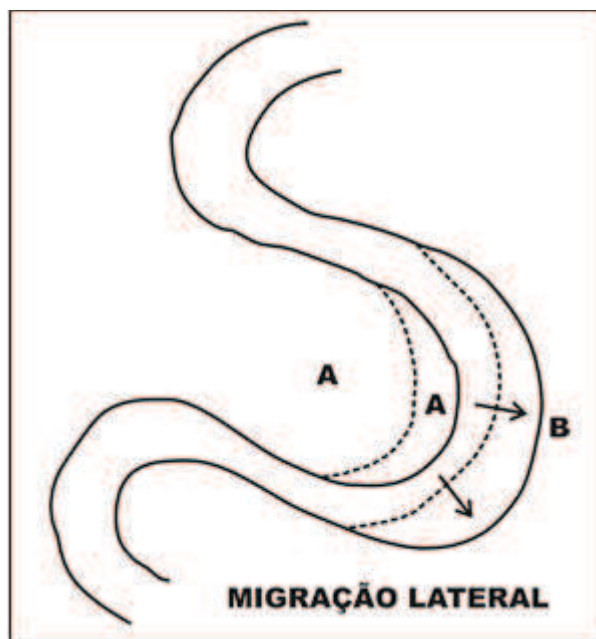


Figura 1.16 - Migração Lateral – Adaptado de Schumm (1994).

1.3.3 O Processo de Transporte e Deposição Fluvial

O processo de transporte e deposição fluvial ocorre por meio de dois principais mecanismos: carga de fundo e carga em suspensão. A carga de fundo consiste no transporte de sedimentos por correntes trativas, em que cada grão movimenta-se individualmente ao longo do substrato, sendo que os grãos maiores são transportados por arrasto e rolamento, enquanto que os grãos menores são transportados por saltação. Na carga em suspensão os grãos são carregados pela turbulência do fluxo, limitados pela granulometria.

1.3.4 Litofácies

Litofácies é o termo utilizado na geologia sedimentar para distinguir corpos de rochas que registram processos sedimentares diferentes, sendo caracterizada por cinco atributos: geometria, textura, estrutura, conteúdo fossilífero e paleocorrentes (Miall, 1996). A escala de uma unidade individual de litofáceis depende do nível de detalhe incorporado em sua definição (Miall, 1996). Pode-se definir uma série de litofácies para sistemas fluviais baseados principalmente na textura e na estrutura (Scherer, 2008).

Na Tabela 1.5, pode-se observar a classificação de litofácies fluviais (Miall, 1996), mas que não se restringe somente a estas informações. Podem ser refinadas com novas informações, desde que baseadas em observações e pesquisas de campo detalhadas, para serem incorporadas como unidades novas.

Tabela 1.5 - Classificação de litofáceis fluviais (adaptado de Miall, 1996).

Código	Fácies	Estruturas Sedimentares	Interpretação
Gmm	Cascalho maciço matriz-suportado	Gradação incipiente	Fluxo de detritos plástico, fluxo viscoso, alta coesão interna.
Gmg	Cascalho matriz-suportado	Gradação inversa a normal	Fluxo de detritos pseudoplástico, fluxo viscoso, baixa coesão interna.
Gci	Cascalho clasto-suportado	Gradação inversa	Fluxo de detritos, alta concentração de clastos (alta coesão interna) ou fluxo de detritos pseudoplástico (baixa coesão).
Gcm	Cascalho maciço clasto-suportado	-	Fluxo de detritos pseudoplástico (fluxo turbulento).
Gh	Cascalho clasto-suportado, acamamento incipiente	Acamamento horizontal, imbricamento	Formas de leito longitudinais, depósitos residuais (<i>lags</i>).
Gt	Cascalho estratificado	Estratificações cruzadas acanaladas	Preenchimento de pequenos canais.
Gp	Cascalho estratificado	Estratificações cruzadas planares	Formas de leito transversais, crescimento deltaico a partir de barras remanescentes.
St	Areia fina a muito grossa (cascalhosa)	Estratificações cruzadas acanaladas	Dunas 3D, cristas sinuosas ou lingüóides.
Sp	Areia fina a muito grossa (podendo ser cascalhosa)	Estratificações cruzadas planares	Dunas transversais 2D.
Sr	Areia muito fina a grossa	Laminações cruzadas de marcas onduladas	Marcas onduladas (regime de fluxo inferior).
Sh	Areia muito fina a grossa (podendo ser cascalhosa)	Laminação horizontal, lineação de partição	Formas de leito plano (regime de fluxo superior/crítico).
Sl	Areia muito fina a grossa (podendo ser cascalhosa)	Estratificações cruzadas de baixo ângulo (<15°) (podendo ser sigmoidais)	Preenchimento de suaves depressões (<i>scour fills</i>), dunas atenuadas, antidunas.

Código	Fácies	Estruturas Sedimentares	Interpretação
Ss	Areia fina a muito grossa (podendo ser cascalhosa)	Amplas e suaves depressões	Preenchimento de suaves depressões (<i>scour fills</i>)
Sm	Areia fina a grossa	Maciça ou laminação indistinta	Depósitos de fluxos hiperconcentrados, fluidizações ou intensa bioturbação.
Fl	Areia, silte, lama	Laminações finas, laminações cruzadas de marcas onduladas de muito pequeno porte	Depósitos externos ao canal, canais abandonados ou depósitos de inundação
Fsm	Silte, lama	Maciço	Depósitos externos ao canal ou canais abandonados
Fm	Lama, silte	Maciço, gretas de contração	Depósitos externos ao canal ou canais abandonados
Fr	Lama, silte	Maciço, raízes, bioturbação	Solo incipiente
C	Carvão, lama carbonosa	Restos vegetais, filmes de lama	Depósito de pântanos vegetados (<i>swamps</i>)
P	Paleossolo carbonático (calcita, siderita)	Feições pedogênicas: nódulos, filamentos	Solo com precipitação química

1.3.5 Elementos Arquiteturais

Os elementos arquiteturais são definidos por um conjunto de litofácies que têm uma organização própria e, consequentemente, uma geometria. A maioria destes elementos são representados por macroformas, que tem como produto o efeito da acumulação de sedimentos por longos períodos, de dezenas a milhares de anos. São caracterizados, também, pela sua geometria externa e interna, associação de fácies e escala, que representa um conjunto de processos atuando em um sistema deposicional (Miall, 1996).

Segundo Brierley (1996), um conjunto desses elementos determina:

- o estilo fluvial;
- infere sobre o ambiente deposicional;
- o controle sobre o arranjo de empilhamento dos elementos;
- o modelamento preditivo da interconectividade entre as unidades deposicionais; e
- indica a geometria do reservatório.

Para se identificar os elementos arquiteturais, Miall (1996) propôs os seguintes itens:

- **Natureza das superfícies inferior e superior que limitam o pacote:** erosional ou gradacional, planar, irregular, curva (côncava para cima ou convexa para cima).
- **Geometria externa:** lençol (*sheet*), lente (*lens*), cunha (*wedge*), pá (*scoop*), preenchimento em U.
- **Escala:** espessura, extensão lateral (paralela e perpendicular à direção de fluxo).
- **Litologia:** assembleia de litofácies e sequência vertical.
- **Geometria interna:** natureza e disposição das superfícies internas, relação entre o acamamento e as superfícies de 1ª e 2ª ordens (paralela, truncada, *onlap*, *downlap*).

- **Padrão de paleocorrentes:** orientação dos indicadores de fluxo em relação às superfícies internas e formas externas do elemento.

Na Tabela 1.6, pode-se observar as informações referentes ao elemento arquitetural, símbolo, associação de fácies, geometria e arquitetura interna e a interpretação de cada elemento.

Tabela 1.6 - Elementos arquiteturais formados dentro de canais fluviais (adaptado de Miall, 1996).

Elemento Arquitetural	Símbolo	Associações de fácies	Geometria e arquitetura interna	Interpretação
Canal	CH	Combinação variada	Corpos sedimentares com geometria em lente, lençol ou fita, limitada por superfícies erosivas côncavas (superfície de 5ª ordem). Escala altamente variada.	Preenchimento de canais menores internos ao cinturão de canais, canais de rompimento de meandros (<i>chute channels</i>).
Fluxo Gravitacional de Sedimento	SG	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	Corpos com geometria lenticular, normalmente intercalados com elementos GB e SB. Espessura e extensão lateral variada.	Amalgamação de sucessivos episódios de fluxos de detritos.
Barras Cascalhosas e Formas de Leito	GB	Gm, Gp, Gt	Corpos tabulares ou em lente formado por complexos amalgamados de <i>sets</i> de estratos cruzados. Espessura de 0,5 a 1,5 m e dezenas de metros de extensão lateral.	Barras longitudinais cascalhosas
Depósitos de Acresção Frontal	DA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Corpos lenticulares constituídos por <i>sets</i> de estratos cruzados simples de grande porte ou estratos cruzados compostos caracterizados por <i>sets</i> de pequeno a médio porte limitado por superfícies inclinadas a favor do fluxo (superfície de 1ª, 2ª ou 3ª ordem). Espessura de 2 a 5m e extensão lateral máxima de 250m.	Migração a favor do fluxo de barras arenosas de meio canal.

Elemento Arquitetural	Símbolo	Associações de fácies	Geometria e arquitetura interna	Interpretação
Depósitos de Acresção Lateral	LA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss. Raramente Gm, Gt e Gp.	Corpos lenticulares ou cuneiformes, contendo <i>sets</i> de estratos cruzados separados por superfícies de acresção lateral (superfície de 1ª, 2ª ou 3ª ordem). Espessura de 2 a 30m e extensão lateral máxima de 300m.	Barras em pontal ou acresção lateral em barras de meio de canal.
Lençóis de Areia	LS	Sh, Sl; raramente St, Sp, Sr	Corpos com geometria em lençol, formados por complexos amalgamados de estratos plano-paralelos ou de baixo - ângulo. Espessura de 0,4 a 2,5m e extensão lateral máxima de 200m.	Lençóis de areia formados em contextos de rápida descarga.
Formas de Leito	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Corpos com geometria em lente ou lençol formado por <i>sets</i> amalgamados de estratos cruzados separados por superfícies (1ª, 2ª ou 3ª ordem) subhorizontais. Espessura de 1 a 4 metros e extensão lateral de dezenas a centenas de metros.	Migração e cavalgamento de dunas subaquosas.
Escavações (<i>Scour Hollow</i>)	HO	Sh, Sl	Corpos com geometria lenticular, limitados na base por superfícies erosivas côncavas. O mergulho dos planos de acamamento da litofácies Sl é paralelo à superfície limítrofe basal. Espessura máxima de 20 metros e extensão de até 250m.	Feições erosivas formadas em regiões de confluência de fluxo, ou a jusante de barras arenosas de meio de canal.

Os elementos arquiteturais de canais fluviais podem ser individualizados como: canal (CH), depósito de acresção frontal (DA), depósito de acresção lateral (LA), formas de leito (SB), lençóis de areia (LS), escavações (HO), barras cascalhosas e formas de leito (GB) e fluxo gravitacional de sedimentos (SG), como observado na Tabela 1.6 e ilustrado na Figura 1.17.

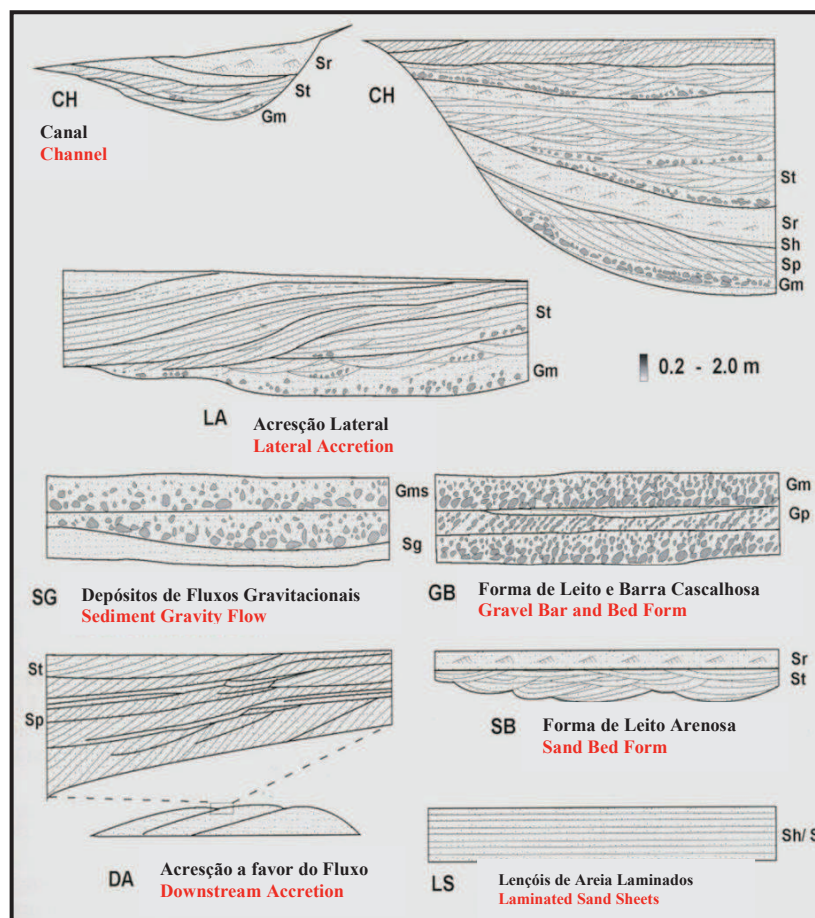


Figura 1.17 - Elementos arquiteturais – interno aos canais fluviais (adaptado de Miall, 1996).

Os elementos arquiteturais de canais formados na área externa aos canais fluviais podem ser individualizados como: dique marginal (LV), canais de crevasse (CR), expraçamento de crevasse (CS), finos de planície de inundação (FF) e canal abandonado (CH (FF)), como pode-se observar na Tabela 1.7 e na Figura 1.18.

Tabela 1.7 - Elementos arquiteturais formados na área externa aos canais fluviais (adaptado de Miall, 1996)

Elemento Arquitetural	Símbolo	Associações de fácies	Geometria e arquitetura interna	Interpretação
Dique Marginal	LV	Fl	Depósitos em cunha anexados lateralmente aos corpos arenosos fluviais.	Deposição de sedimentos arenosos na margem do canal durante períodos de extravasamento.
Canais de Crevasse	CR	St, Sr, Ss	Corpos arenosos com geometria em fita.	Rompimento do canal principal.
Expraçamento de Crevasse	CS	St, Sr, Fl	Lentes.	Progradação como um delta de canal de crevasse numa planície de inundação.

Elemento Arquitetural	Símbolo	Associações de fácies	Geometria e arquitetura interna	Interpretação
Finos de Planície de Inundação	FF	Fsm, Fl, Fm, Fr	Forma tabular.	Acumulação em corpos lacustres ou pântanos de planície de inundação.
Canal Abandonado	CH (FF)	Fsm, Fl, Fm, Fr	Corpos em fita comparáveis em largura e espessura aos canais principais.	Lagos associados a canais abandonados.

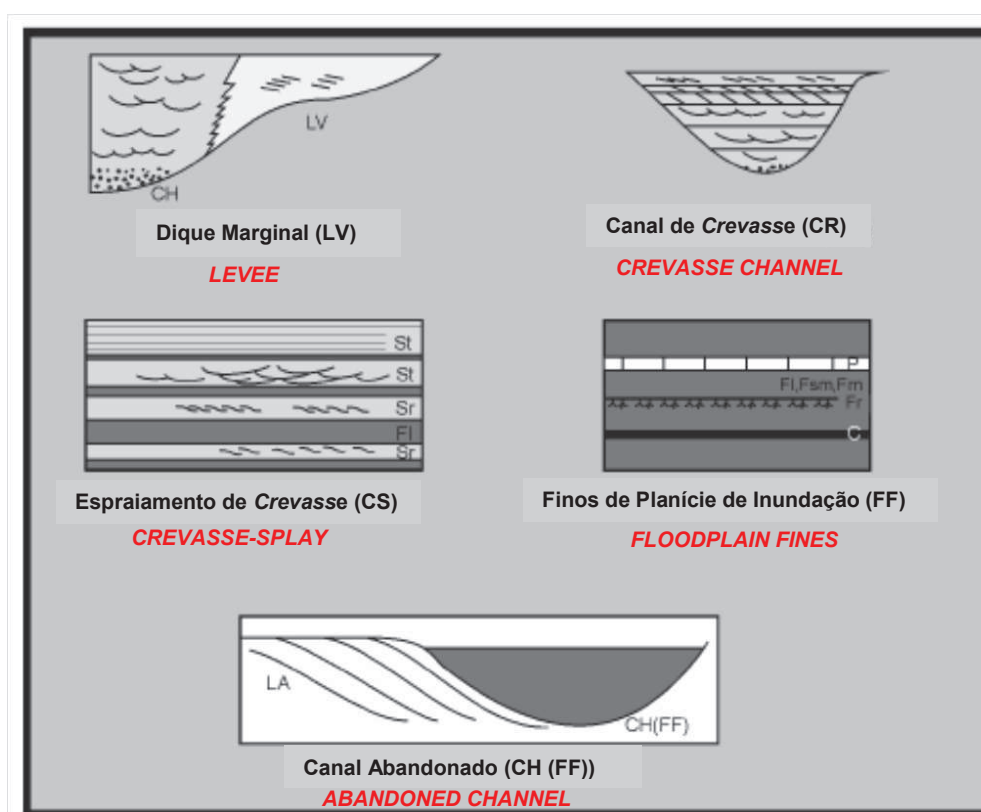


Figura 1.18 - Elementos arquiteturais – externo aos canais fluviais (adaptado de Miall, 1996).

1.3.6 Classificação dos Estilos Fluviais

O termo sistema fluvial, segundo Miall (1996), abrange três zonas principais:

- zona de produção (bacia de drenagem ou área-fonte),
- zona de transferência (rios) e
- zona de deposição (planície aluvial, leque aluvial, delta ou corpos d'água).

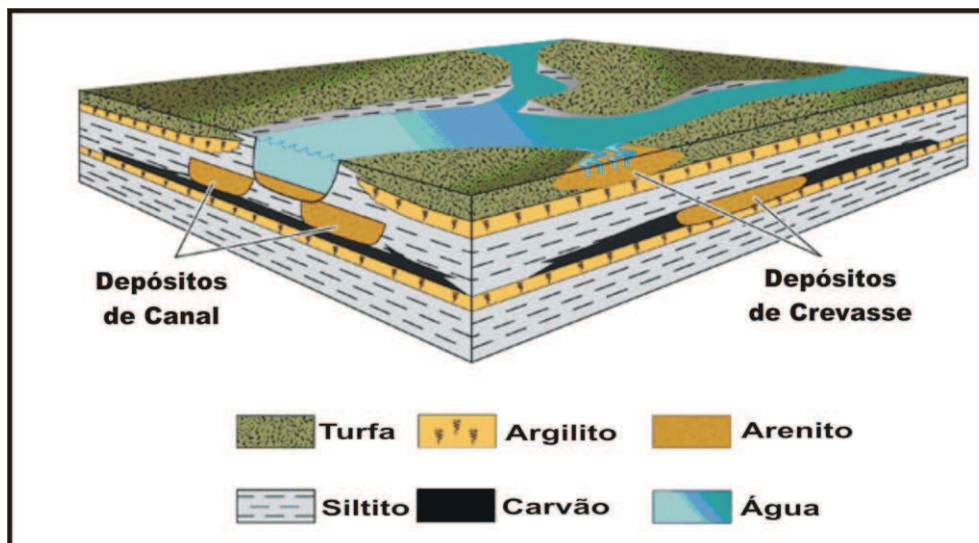


Figura 1.19 - Bacia de inundação fluvial (adaptado de Lange, 2012).

Na Figura 1.19, pode-se observar na zona de deposição os canais em forma de calhas com depósitos de areias e a mesma unidade de fácies aparece nos depósitos de *crevasse*. Observa-se, também, a presença de turfa na parte inferior dos depósitos de canal com uma camada de argila abaixo desta.

No modelo teórico (Figura 1.20) apresentado por Miall (1996), pode-se observar as diversas características que compõe o sistema fluvial meandrante e suas respectivas denominações, de acordo com a Tabela 1.8.

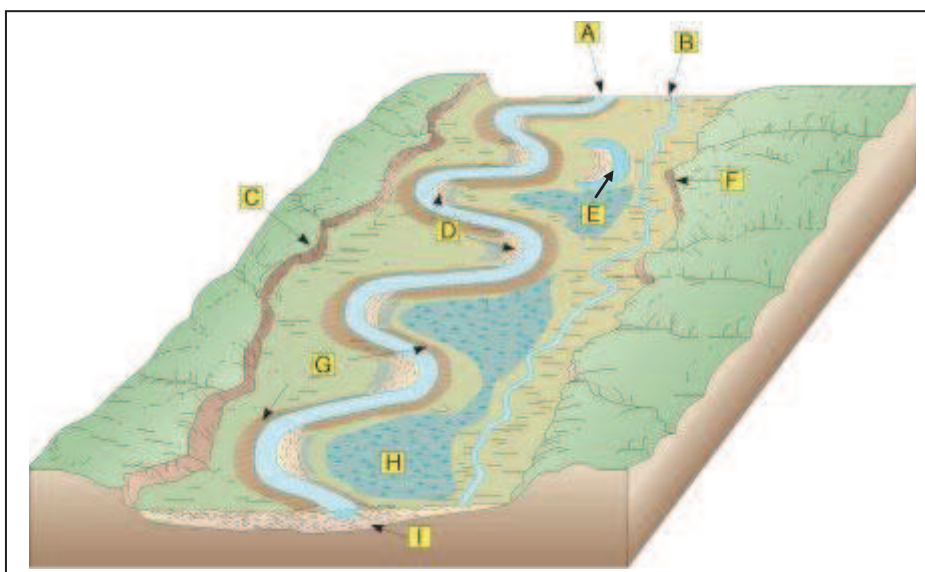


Figura 1.20 - Modelo teórico de um sistema meandriforme (adaptado de McKnight and Hess, 2012).

Tabela 1.8 - Denominações do modelo teórico (Miall, 1996)

Letra	Denominação	Letra	Denominação
A	Canal	F	Delimitação do vale
B	Rio Tributário	G	Dique Marginal
C	Delimitação do vale	H	Planície de Inundação
D	Barra em Pontal	I	Depósito aluvial

Letra	Denominação	Letra	Denominação
E	Meandro abandonado (<i>oxbow lake</i>)		

Na Figura 1.21, pode-se observar a representação real das características apresentadas na Tabela 1.8 referente ao modelo teórico, com a presença de lagoas em forma de lua crescente (*oxbow lake*), o canal principal e rios tributários, assim como as áreas de inundação.

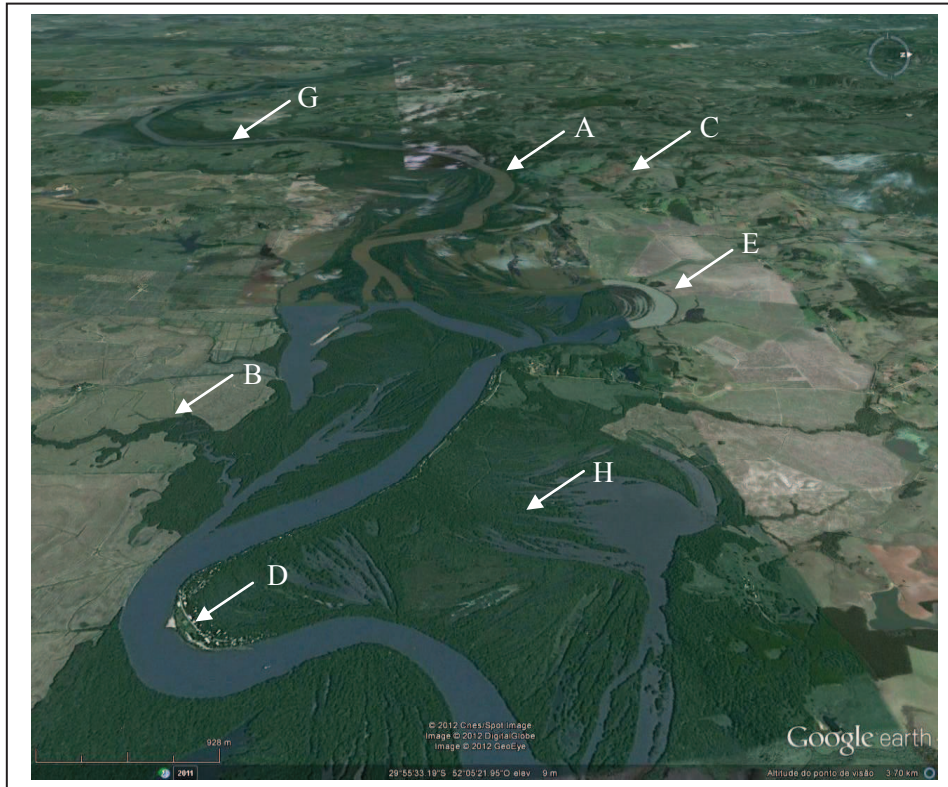


Figura 1.21 - Rio Jacuí – representação real do modelo teórico apresentado na Figura 1.20 (Fonte: Google Earth 2012)

Sobre o estilo fluvial dos canais, algumas características morfodinâmicas são importantes e podem ser definidas por duas classificações:

Primeira - na dinâmica de transporte de sedimentos do canal, utilizada por Miall (1996) (Tabela 1.9):

Tabela 1.9 - Dinâmica de transporte de sedimentos (Miall, 1996).

Modo de transporte de sedimento e tipo de canal	Carga de fundo (porcentagem do total da carga)	Sistema de canal simples	Sistema de multi-canais
Carga em suspensão (<i>Suspended load</i>)	< 3	Sistema meandrante Canal de carga de suspensão. Razão W/D < 10, Sinuosidade > 2, Gradiente relativamente baixo	Sistema anastomosado
Carga mista (<i>Mixed load</i>)	3 - 11	Canal de carga mista. Razão W/D 10-40,	Distributários de deltas e

Modo de transporte de sedimento e tipo de canal	Carga de fundo (porcentagem do total da carga)	Sistema de canal simples	Sistema de multi-canais
		Sinuosidade < 2, Gradiente moderado	distributários de planície aluvial
Carga de fundo (<i>Bed load</i>)	>11	Canal de carga de fundo. Razão W/D > 40, Sinuosidade < 1.3, Gradiente relativamente alto.	Distributários de leques aluviais

W/D=largura/profundidade

Segunda – na morfologia do canal, utilizada por Rust (1978) (Tabela 1.10):

Tabela 1.10 - Morfologias de canais aluviais classificado pelas características geométricas (Rust, 1978)

	Canal simples (<i>braiding parameter</i> < 1)	Multi-canal (<i>braiding parameter</i> > 1)
Baixa sinuosidade (P < 1,5)	Reto	Entrelaçado
Alta sinuosidade (P > 1,5)	Meandrante	Anastomosado

A morfologia de canais fluviais, no que se refere à sinuosidade, está associada à profundidade, pois conforme a Tabela 1.10, quanto maior a profundidade, mais alta será a sinuosidade do canal, podendo ser classificado em meandrante (canal simples) e anostomosado (multi-canal). Quanto a definição do tipo de canal será representado pelo *braiding parameter* (Bp), expresso por:

$$Bp = \sum L_b / L_m \quad (8)$$

onde:

$\sum L_b$ - é o comprimento da barra no meio do canal (Figura 1.22);

L_m - é o comprimento de onda do meandro em cada parte do cinturão do canal (Figura 1.22).

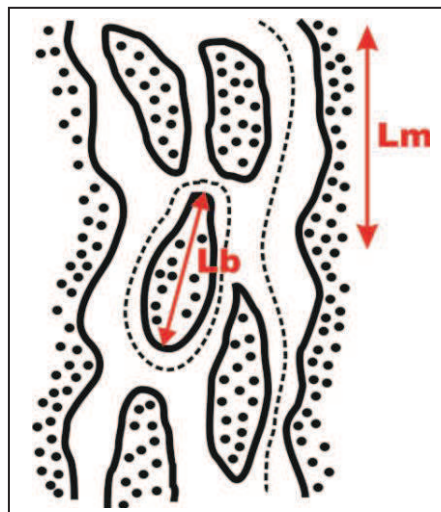


Figura 1.22 - Medidas utilizadas no cálculo do *braiding parameter* (adaptado de Friend & Sinha, 1993)

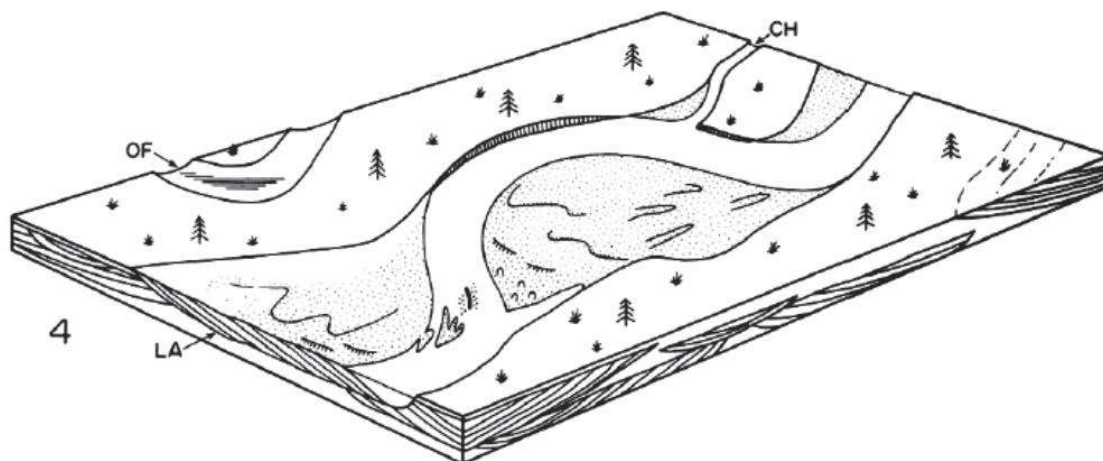


Figura 1.23 - Canal simples com alta sinuosidade – Rio Meandrante (Miall, 1985)

Na Figura 1.23, pode-se observar a alta sinuosidade do canal meandrante, com a identificação da acreção lateral (LA) formada ao longo do canal. Nesta figura, tem-se um exemplo de *braiding parameter* menor do que 1.

1.3.7 Contexto Geológico – Bacia do Paraná – Formação Rio Bonito

A Bacia do Paraná, localizada em sua grande parte no território brasileiro, estende-se também para o Paraguai, Uruguai e Argentina. Tem como característica sucessões exclusivamente sedimentares no intervalo paleozoico e sucessões sedimentares que culminam com derrames vulcânicos no mesozoico (Schneider *et al.*, 1974; Milani *et al.*, 2007; Boardman, 2011). Essas sucessões sedimentares compõem seis supersequências (Figura 1.24) separadas por discordâncias, denominadas Rio Ivaí (Ordoviciano – Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero – Permiano), Gondwana II (Triássico), Gondwana III (Neojurássico – Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Milani *et al.* 2007).

Os depósitos do Carbonífero Superior e Permiano da Bacia do Paraná correspondem à Supersequência Gondwana I, que refere-se às rochas dos Grupos Itararé, Guatá e Passa Dois. Segundo Milani (2007), esta supersequência é caracterizada por litologias heterogêneas, relativas a processos e ambientes de natureza distinta, com registros glaciais e pós-glaciais, de origem marinha, continental e transicional.

A Formação Rio Bonito constitui a unidade basal do Grupo Guatá, que compõe a base da Supersequência Gondwana I (Milani *et al.*, 2007; Lopes *et al.*, 2003). Segundo Lopes *et al.* (2003), o contato entre a Formação Rio Bonito e o Grupo Itararé é expresso por uma superfície discordante de caráter abrupto. Quanto às características litológicas, a Formação Rio Bonito inclui siltitos, argilitos, carvão, arenitos, diamictitos e ortoconglomerados (Aboarrage & Lopes, 1986; Tognoli, 2006; Cagliari, 2014; Milani *et al.*, 2007). Essas sucessões litológicas organizam-se em padrões de empilhamento progradante, retrogradante e agradante que constituem parte de um grande ciclo transgressivo do permocarbonífero da Bacia do Paraná.

No Rio Grande do Sul, na Formação Rio Bonito são identificados dois intervalos distintos: um basal, com espessuras variando em função do paleorrelevo, da ordem de dezenas de metros, composto predominantemente por camadas de arenitos arcoseanos médios a grossos maciços ou com intercalação de lâminas de siltito cinza a cinza escuro, camadas de heterolitos sílticos e arenosos e siltitos cinza a cinza escuros e carbonosos. O intervalo superior tem espessuras da ordem de dezenas de metros e é composto por uma sucessão de camadas com predominância de siltitos cinzas a cinza escuros e carbonosos, intercalando-se camadas de carvão, paraconglomerados com matriz síltico-carbonosa e arenitos (Pimentel & Godoy, 1983).

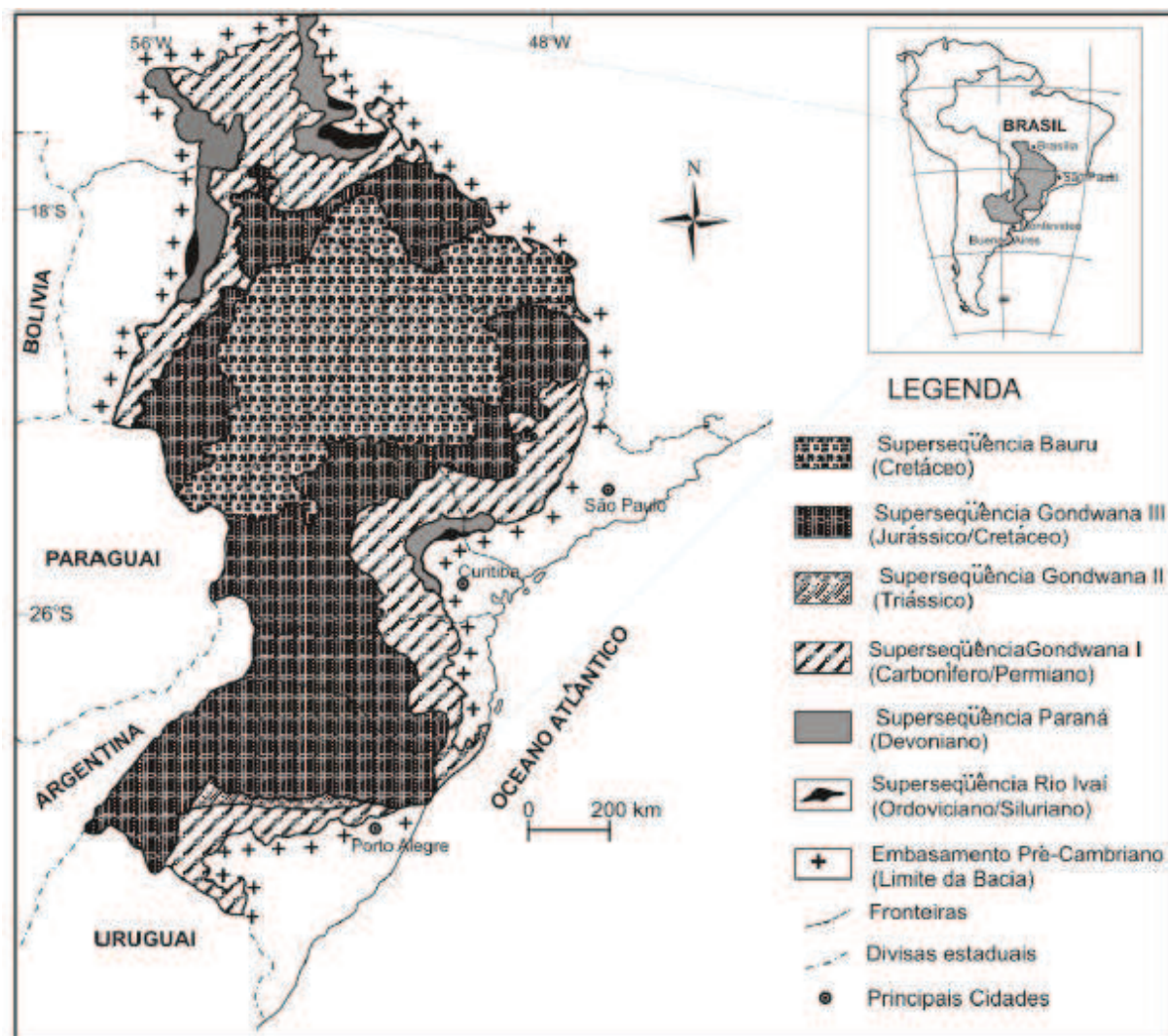


Figura 1.24 - Localização e distribuição das superseqüências da Bacia do Paraná (Boardman, 2011)

Na região do município de Mariana Pimentel, a Formação Rio Bonito aflora no Paleovale Mariana Pimentel, que representa uma extensão da área de sedimentação da Bacia do Paraná na borda norte do Escudo Sul-Riograndense. O Paleovale estende-se desde a região sul da jazida de carvão Mina do Leão até o interior do embasamento granítico-gnáissico de idade neoproterozóica (Figura 1.25). No limite noroeste, afloram rochas do Grupo Itararé, enquanto que para oeste aflora de forma restrita a Formação Palermo (Lopes *et al.*, 2003; Boardman, 2011).

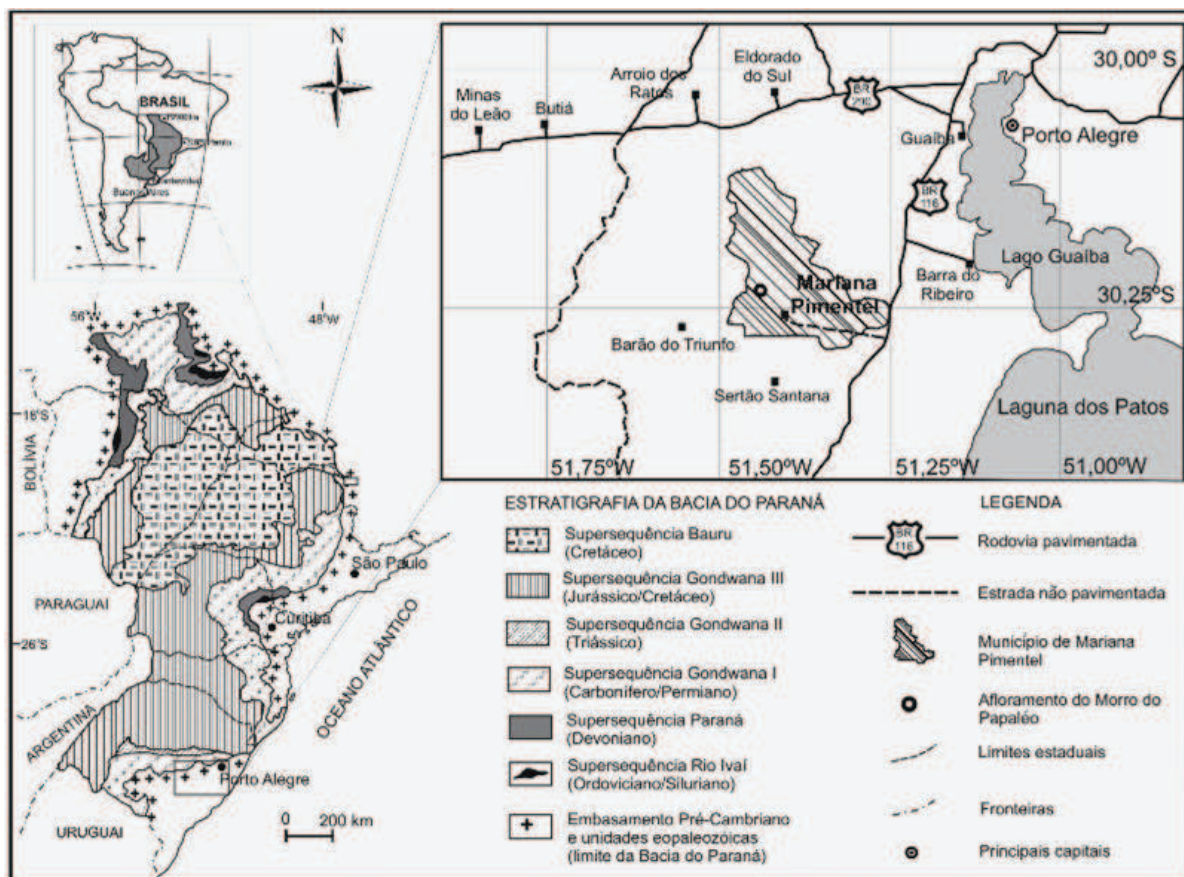


Figura 1.25 - Distribuição das superseqüências estratigráficas da Bacia do Paraná com a localização do município de Mariana Pimentel. (Smaniotto *et al.*, 2006)

No Paleovale, o registro sedimentar abrange rochas pertencentes aos Grupos Itararé (Formação Rio do Sul) e Guatá (Formações Rio Bonito e Palermo), destacando-se a Formação Rio Bonito pela presença de camadas de carvão que compõem as jazidas denominadas de Faxinal, Água Boa e Sul do Leão (Aboarrage & Lopes, 1986), (Figura 1.26).

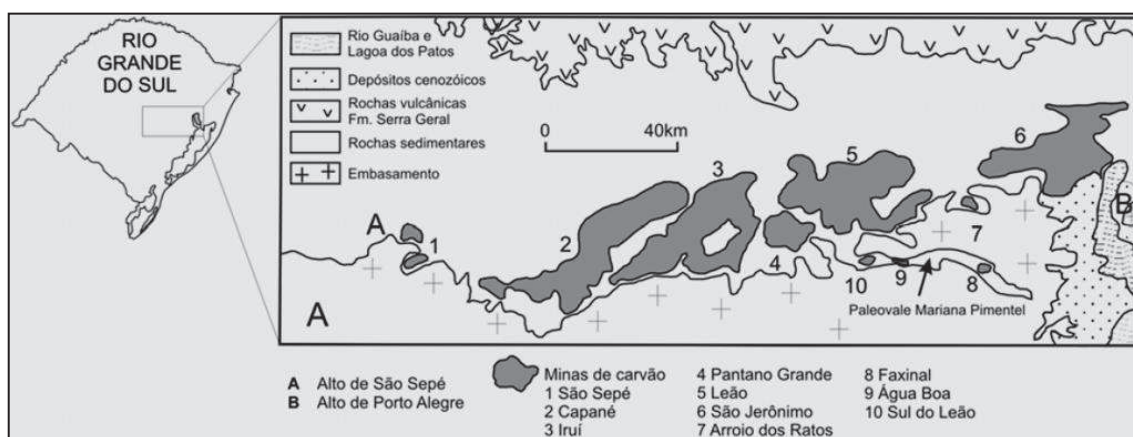


Figura 1.26 – Localização das Jazidas de Carvão no Paleovale Mariana Pimentel (Boardman, 2011)

O Afloramento Morro Papaléo é o principal afloramento da Formação Rio Bonito na porção leste do Paleovale Leão-Mariana Pimentel (Figura 1.27), destacando-se pela geomorfologia com erosão diferencial dos arenitos e siltitos carbonosos e diamictitos da base da Formação Rio Bonito em relação aos lutitos (Burjack *et al.*, 1982). O Afloramento tem um comprimento de aproximadamente 400 metros, com largura aproximada de 120 metros e altura de 12 metros.

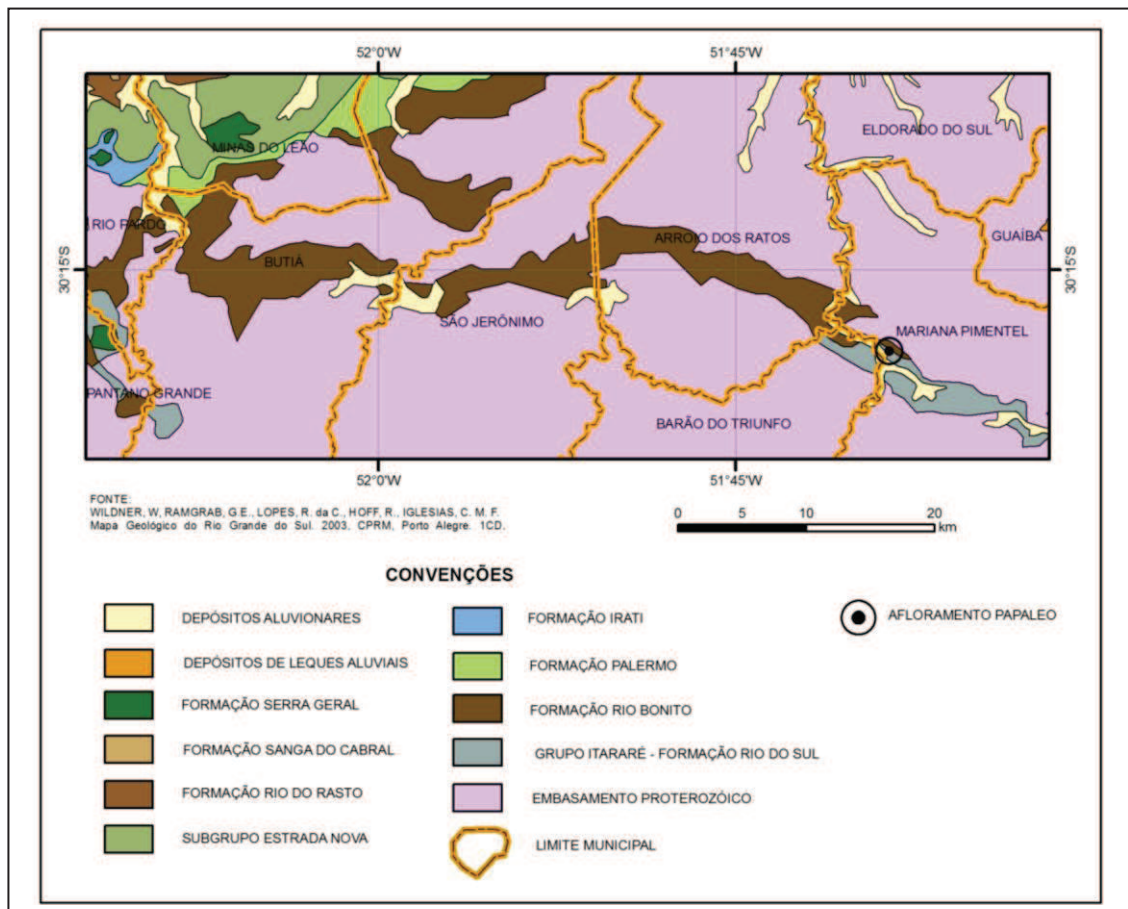


Figura 1.27 – Localização do Afloramento Morro Papaléo no Paleovale Leão-Mariana Pimentel

Do ponto de vista deposicional, as rochas da Formação Rio Bonito do Morro Papaléo foram interpretadas por Silveira (2000) como um sistema fluvial meandriforme, representado por rochas associadas a barras fluviais, preenchimento de canais abandonados e turfeiras associadas a planícies de inundação. Essa sedimentação, em contexto fluvial, é interpretada como decorrente do preenchimento de vales escavados por processos glaciais durante o Carbonífero, (Lopes *et al.*, 2003). Segundo Iannuzzi *et al.* (2003a; 2003b), os depósitos do Afloramento Morro Papaléo compreendem cerca de 50 metros de espessura, sendo que a porção basal ocorrem ritmitos siltico-argilosos, intercalados por níveis de silticos carbonosos, passando a um intervalo caracterizado por siltitos maciços ou com laminação plano-paralela intercalados por siltitos avermelhados. Ocorre também uma sucessão de arenitos muito finos a médios, lenticulares e com laminação ondulada truncante e siltitos finamente laminados. Há o registro de uma superfície erosiva que corresponde ao limite entre o Grupo Itararé e a Formação Rio Bonito, mapeado por Silva Filho (1974) e Corrêa da Silva (1978).

Os depósitos de carvão (Figura 1.28), que ocorrem na região do município de Mariana Pimentel, estão registrados na Formação Rio Bonito, unidade esta, associada às condições pós-glaciais que ocorreram na porção do Gondwana no Eopermiano, com predomínio de arenitos e pelitos associados a espessos níveis de carvão, representando ambientes transicionais, como deltas, lagunas e estuários (Milani *et al.*, 2007; Boardman, 2011).

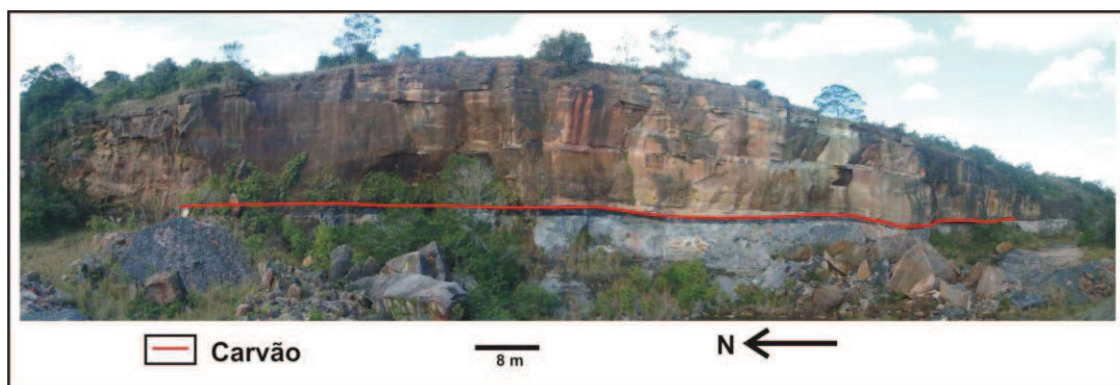


Figura 1.28 – Identificação da camada de carvão no Afloramento Morro Papaléo

O pacote de rochas que evidencia a superfície erosiva é composto por arenitos de granulometria média a muito fina, com camadas lenticulares. Observa-se, no Afloramento, um pacote constituído por arenitos finos, com camadas tabulares, estruturalmente maciços seguido por paraconglomerados maciços (diamictitos) intercalados por camadas de siltitos carbonosos. A base da sucessão aflorante é interpretada como tendo sido depositada de um ambiente de águas calmas do tipo lagunar a lacustre (Boardman, 2011). As camadas sobrejacentes, já pertencentes à Formação Rio Bonito, foram consideradas como depósitos fluviais gerados, aparentemente, muito próximos à linha de costa.

1.4 HIPÓTESES E OBJETIVOS

É notório, conforme contextualização supracitada que, desde o início da utilização do *LST* para fins de modelagem digital de afloramentos, várias são as dúvidas e dificuldades encontradas na utilização dessa tecnologia no processo de geração de modelos geológicos 3D, envolvendo diversas fontes de dados.

Portanto, a tese visa analisar as seguintes hipóteses:

1 – A metodologia de campo é adequada para obtenção de dados geométricos em afloramento com o uso de *LST*.

2 – É possível utilizar outra metodologia de reconstrução 3D para a obtenção da nuvem de pontos a ser integrada no modelo digital de afloramento.

3 – É possível gerar modelos geológicos 3D integrando diferentes técnicas de sensoriamento remoto, como *GPR*, *LST*, *GNSS* e Topografia, sem perdas de informações e com um nível de exatidão compatível para modelagem digital de afloramentos.

Dentro deste contexto, a hipótese inicial desta investigação, tem como pressuposto que é possível gerar modelos geológicos 3D integrando diferentes técnicas de sensoriamento remoto não orbital, sem perdas de informações e com um nível de exatidão compatível para modelagem digital de afloramento.

1.4.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foi:

- Analisar a exatidão posicional de um modelo tridimensional gerado com base na integração de diferentes técnicas de sensoriamento remoto.

1.4.2 Organização dos Capítulos da tese

A presente tese está organizada em quatro capítulos principais e um capítulo com as conclusões do trabalho apresentado. Dois destes capítulos (2 e 3) estão redigidos em inglês no formato exigido pelo conselho editorial da revista onde foram submetidos. O capítulo 2 foi publicado no *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* e o capítulo 3 foi submetido no *The Scientific World Journal* da *Hindawi Publishing Corporation*. Os outros capítulos foram redigidos em português, e o quarto capítulo será submetido em volume especial da série da editora *Springer Briefs in Earth Sciences*.

A seguir, tem-se uma breve descrição sobre cada um dos capítulos:

Capítulo 1 - este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as técnicas envolvidas na obtenção de dados geológicos com o uso de *Laser Scanner* Terrestre e *Ground Penetration Radar* (GPR). Ele descreve, também, os conceitos sobre sistemas fluviais e a formação geológica do afloramento estudado, assim como, os principais objetivos da pesquisa.

Capítulo 2 – descreve a análise da acuracidade posicional de afloramento mapeado com técnica *LIDAR*, a partir do uso de *Laser Scanner* Terrestre (*LST*) e apoiado em pontos georreferenciados com receptor *GNSS-GPS*. Usando os dados de campo, foi possível gerar o Modelo Digital de Afloramento (MDA), o que permitiu a visualização precisa, medição e interpretação de características geológicas. Observou-se que as diferenças não foram significativas entre os dados de controle, medidos com estação total, e os dados adquiridos com *Laser Scanner* Terrestre. Assim, utilizou-se como parâmetro, para modelagem geológica, a parte superior da camada de carvão por estar visível nos dois lados do afloramento. Executou-se uma

validação de campo para assegurar que a qualidade da metodologia proposta foi adequada para este tipo de análise. Portanto, pode-se concluir que MDA obtido de *LST* tem coeficiente de correlação elevado em comparação com os métodos convencionais (estação total), o que permite uma independência para manipulação do modelo principalmente em locais de difícil acesso do afloramento. Este capítulo foi publicado no *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* em abril de 2014.

Capítulo 3 – este capítulo descreve a acuracidade posicional da nuvem de pontos obtidas a partir da modelagem base de imagem com fotografias digitais, comparando-se com o erro posicional da nuvem de pontos obtida pela técnica *LIDAR*, através de *Laser Scanner* Terrestre. Foram medidos pontos de controle na superfície do afloramento, com o uso de Estação Total apoiado em pontos georreferenciados com *GNSS*. As fotos do afloramento foram registradas em posições estratégicas, obtendo-se sobreposições para gerar a nuvem de pontos. O modelo gerado a partir das fotos permitiu analisar a acuracidade do posicionamento, no qual se obteve uma média de 37,5 cm de erro em relação aos pontos de controle advindos da Estação Total. Quanto à acuracidade relativa obteve-se um erro menor do que 5cm, comparando-se entre as medidas obtidas na modelagem base de imagem a partir de fotos e o *Laser Scanner* Terrestre. Assim pode-se afirmar que o uso desta técnica permite bons resultados na modelagem digital de afloramento, desde que esteja apoiado em dados georreferenciados. Parte deste capítulo foi publicado como resumo expandido e apresentado no *First Vertical Geology Conference*, em fevereiro de 2014, realizado na Universidade de Lausanne na Suíça, e o trabalho completo foi submetido no *The Scientific World Journal*, no dia 21 de maio de 2014.

Capítulo 4 - descreve sobre a modelagem geológica de afloramento com base na integração dos dados de superfície e subsuperfície, obtidas respectivamente, da técnica *LIDAR* (com o uso *Laser Scanner* Terrestre) e do *Ground Penetration Radar* (GPR). Foram levantadas informações no campo com as duas técnicas de imageamento, sendo necessária, a implantação de pontos de apoio, rastreados com *GNSS*, e também, pontos medidos com o uso de Estação Total. Esse último foi necessário para outras aplicações como o controle posicional dos dados, a demarcação das seções geofísicas e para a modelagem do topo do afloramento. Para ambas as situações do trabalho de campo, utilizou-se o mesmo sistema de referência o que permitiu um controle na integração dos dados. Com a junção das informações, advindas das duas técnicas de imageamento, foi possível modelar superfícies geológicas interpretadas, tanto nas seções geofísicas (*GPR*), quanto na superfície externa do afloramento a partir da nuvem de pontos obtidas com o *Laser Scanner* Terrestre. O resultado deste capítulo será submetido na série da editora *Springer Briefs in Earth Sciences*.

Capítulo 5 – este capítulo analisa as conclusões e considerações finais dos capítulos anteriores e discute as limitações desta tese como um ponto de referência para trabalhos futuro.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abmayr, T., Härtl, F.; Mettenleiter, M., Heinz, I., Hildebrand, A., Beumann, B., Fröhlich, C. 2004. Realistic 3D-Reconstruction - Combining Laserscan Data with RGB-Color Information. *ISPRS-International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol XXXV, Part B5: 198-203.
- Aboarrage, A. M. & Lopes, R. C. 1986. *Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica*. Porto Alegre. DNPM – CPRM. v.18.
- Akinpelu, O. C. 2010. *Ground Penetrating Radar Imaging of Ancient Clastic Deposits: A Tool for Three-Dimensional Outcrop Studies*. PhD Thesis, Geology Department. University of Toronto. Canada, 295 p.
- Annan, A. P. 2001. *Ground Penetration Radar – Workshop Notes*. Sensors & Software Inc., Mississauga, Ontario, Canada.
- Baltsavias, E. P., Favey, E., Bauder, A., Bösch, H., Pateraki, M. 2001 Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacial monitoring. *Photogrammetric Record*, n. 17, p. 243-273.
- Barchik, E., Moser, I., Santos, D. S. dos, Martins, B. D. 2007. Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS – 3D no Ramo da Mineração. *Anais. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3631-363
- Bellian, J. A., Jennette, D.C., Kerans, C., Gibeaut, J., Andrews, J., Yssldyk, B., Larue, D. 2002. *3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology: American Association of Petroleum Geologists (AAPG)*. Search and Discovery Article 40056. Disponível em <http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>. Acesso em 16 de março de 2010.
- Bellian, J. A., Kerans, C., Jennette, D.C. 2005. *Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling*. Journal of Sedimentary Research, n. 75, p.166–176.
- Boardman, D. R. 2011. *Paleobotânica e Palinologia dos Depósitos Eopermianos do Paleovale Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul, Brasil (Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná): Análise Taxonômica e Bioestratigráfica*. RS. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 223p.
- Bordin, F.; Teixeira, E. C.; Rolim, S. B. A.; Tognoli, F. M. W.; Souza, C. N.; Veronez, M. R. 2013. *Analysis of the influence of distance on data acquisition intensity forestry targets by a lidar technique with terrestrial laser scanner*. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences (cd-rom), v. XI-2/w1, p. 99-103, 2013.
- Brierley, G. J. 1996. Channel morphology and element assemblages: a constructivist approach to facies modeling. Carling, P.A. & Dawson, M.R. (eds) *Advances in fluvial dynamics and stratigraphy*. London, John Wiley. p. 263-298.
- Bristow, C. S. & Jol, H. M. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. *Geological Society, London, Special Publications* 2003; v. 211; p. 1-7 doi: 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.01.
- Buckley, S. J., Howell, J. A., Enge, H.D, Kurz, T.H. 2008. *Terrestrial Laser Scanning in Geology: Data Acquisition Processing and Accuracy Considerations*. Journal of the Geological Society, London; 2008, v. 165; ISSUE: 3, p. 625-638. DOI: 10.1144/0016-76492007-100.

- Buckley, S. J., Howell, J.A., Enge, H.D., Leren, B.L.S. and Kurz, T.H. 2006. Integration of terrestrial laser scanning, digital photogrammetry and geostatistical methods for high-resolution modelling of geological outcrops. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Dresden, Germany, Vol. XXXVI, Part B5, proceedings CD.
- Buckley, S. J., Vallet, J., Braathen, A., Wheeler, W. 2008. Oblique helicopter-based laser scanning for digital terrain modelling and visualisation of geological outcrops. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, V. XXXVII, Part B4.
- Burjack, M. I., Klepzig, M. C., Fabricio, M. E., Sommer, M., Toigo, M. M., Paim, P. S., Lavina, E. L. 1982. Perfil paleoecológico do afloramento Morro Papaléo, Permiano Inferior da Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul, Brasil.. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 32, 1982, Salvador. *Anais*, 1982. v. 4. p. 1260-1270.
- Cagliari, J. 2014. *Contexto deposicional e modelagem estratigráfica direta dos depósitos sedimentares Permocarboníferos nas jazidas de carvão Capané e Iruí Central (Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná)*. Tese de Doutorado, Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 230p.
- Casagrande, J. 2010. *Análise Estratigráfica e Estrutural do Intervalo Carbonoso Portador de CBM – EO-Permiano da Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 137p.
- Centeno, J. A. S., Wutke, J. D., Mitishita, E. A., Vögtle, T. 2010. *Two Methods to Estimate the Spot Size of Terrestrial Laser Scanners*. Journal of Surveying Engineering, v. 136, p. 126-131.
- Corrêa da Silva, Z. C. 1978. *Observações sobre o Grupo Tubarão no Rio Grande do Sul, com especial destaque à estratigrafia da Formação Itararé*. Pesquisas, 9: 9-61.
- Davis, J.L., & Annan, A.P. 1989. *Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy*, Geophysical Prospecting, 37 p. 531-551
- Ergün, B. 2011. *Terrestrial Laser Scanning Data Integration in Surveying Engineering*. Laser Scanning. Theory and Applications. Prof. Chau-Chang Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-205-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/laser-scanning-theory-and-applications/terrestrial-laser-scanning-dataintegration-in-surveying-engineering>. v. 1, p. 473-494.
- Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J. 2009. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco. *Journal The American Association of Petroleum Geologists. Geological Society of América. Geosphere*; June 2009; v. 93; no. 6; p. 795-827; DOI: 10.1306/02230908102.
- Ferrari, F., Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Inocêncio, L. C., Paim, P. S. G., Silva, R. M. da. 2012. Visualização e Interpretação de Modelos Digitais de Afloramentos Utilizando Laser Scanner Terrestre. *Geociências (São Paulo. Online)*, v. 31, p. 79-91.
- Freire, R. C. 2006. *Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR*. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 54p.
- Friend, P. F. & Sinha, R. 1993. *Braiding and meandering parameters*, Geological Society, London, Special Publications, January 1, 1993, p. 105-111. Disponível em http://home.iitk.ac.in/~rsinha/PDF's/1993_GeolSoc.pdf. Acesso em 13 de novembro de 2012.
- Gemael, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319 p.

Gonçalves, R. 2007. *Dispositivo de Varredura Laser 3D Terrestre e suas Aplicações na Engenharia, com Ênfase em Túneis*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 103 p.

Google Earth 2012. Consulta realizada em 17/10/2012.

Heritage, G. L. and Large, A. R. G. 2009. Principles of 3D Laser Scanning. In: *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. 1st edition. Blackwell Publishing, ISBN 978-1-4051-5717-9. V1, p. 21-34.

Iannuzzi, R., Marques-Toigo, M., Scherer M. S. C., Caravaca, G., Vieira, E. L. C., Pereira, L. S. 2003a. *Phytobiostratigraphical revaluation of the Southern Brazilian Gondwana sequence (Paraná Basin, Lower Permian)*. 15^o International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy. University Utrecht, 1: 240-242.

Iannuzzi, R., Marques-Toigo, M., Scherer M. S. C., Caravaca, G., Vieira, E. L. C., Pereira, L. S. 2003b. *Reavaliação da Fitobioestratigrafia da Sequência Gondwanica Sul-Riograndense: Estudo de caso do Afloramento Morro do Papaléo (Bacia do Paraná, Permiano Inferior)*. 1^o Encontro sobre estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudos e Bacias. Porto Alegre. Anais, 182-185.

Iannuzzi, R., Scherer, C. M. dos S., Souza, P. A., Holz, M., Caravaca, G., Rodrigues, K. A., Tybusch, G. P., Souza, J. M. de, Smaniotto, L. P., Ficher, T. V., Silveira, A. S. da, Lykawka, R., Boardman, R., Barboza, E. G. 2006. Afloramento Morro do Papaléo, Mariana Pimentel, RS Registro ímpar da sucessão sedimentar e florística pós-glacial do Paleozóico da Bacia do Paraná. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Disponível em <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio101/sitio101.pdf>. Acesso em 7 de outubro de 2009.

IBGE. Geociências. 2009. *Geodésia*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 10 de março de 2009.

Inocencio, L. C., Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Souza, M. K., Silva, R. M., Gonzaga JR, L., Silveira, C. L. B. 2014. *Spectral Pattern Classification in Lidar Data for Rock Identification in Outcrops*. The Scientific World Journal, v. 2014, p. 1-10, 2014.

Jacobi, L., Silva, R. M. da, Markoski, P.R., Veronez, M.R., Tognoli, F.M.W., Paim, P.S.G., Faccini, U.F., Lavina, E.L.C. 2010. Modelo Digital de Afloramento visando a análise e interpretação geológica: um estudo de caso baseado em dados de *Laser Scanner 3D Terrestre*, *Anais do 45^o Congresso Brasileiro de Geologia* PAP916.pdf.

Jones, R. R., Mccaffrey, K. J. W., Imber, J., Wightman, R., Smith, S. A. F., Holdsworth, R.E., Clegg, P.; Paola, N. de, Healy, D., Wilson, R.W. 2008. *Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues*, Geological Society, London, Special Publications, January 1, 2008; 309(1): 87-98.

Jones, R. R., Kokkalas, S., Mccaffrey, K. J. W. 2009. *Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR)--The Arkitsa fault, central Greece, as a case study*. *Geosphere*, December 1, 2009; 5(6): 465-482.

Kurz, T. H., Buckley, S. J., Howell, J. A., Schneider, D. 2008. Geological Outcrop Modelling and Interpretation Using Ground Based Hyperspectral and Laser Scanning Data Fusion. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B8): 1229-1234, 2008. Disponível em http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/12_WG-VIII-12/09.pdf Acesso em 27 de fevereiro de 2009.

Lange, J. P. 2012. *Stratigraphy, Depositional Environments and Coalbed Methane Resources of Cherokee Group Coals (Middle Pennsylvanian) – Southeastern Kansas*. Kansas, 2003. Disponível em <http://www.kgs.ku.edu/PRS/publication/ofr2003-82/index.html>. Acesso em 16 de outubro de 2012.

Leica. 2012. Disponível em www.leica-geosystems.com/hds. Acesso em: 21 de MARÇO. 2012.

Lopes, R. da C., Paim, P. S. G. & Lavina, E. L., 2003 Modelo de reservatório em arenitos litorâneos: ilha de barreira permiana na formação Rio Bonito (Minas do Leão – RS). In: Paim, P. S. G., Garcia, A. J. V., Faccini, U. F. & Lavina, E. L. C. (eds.) *GEOARQ: Uma Abordagem Integrada e Aplicada da Geologia Sedimentar*. UNISINOS. Programa de Pós-Graduação em Geologia, p.:59-77.

Loseth, T. M., Thurmond, J. B., Rivenaes, J. C., Martinsen, O. J., Aiken C., Xu, X. 2007. *Using Outcrop Data in the 21ST Century*. The American Association of Petroleum Geologists. p. 16-20, 2007.

Martinez, A. & Byrnes, A. P. 2001. *Current Research in Earth Sciences, Bulletin* 247, part 1. Disponível em <http://www.kgs.ukans.edu/Current/2001/martinez/martinez1.html>. Acesso em: 30 de março de 2011

McKnight, T. L. and Hess, D. 2012 *Physical Geography: A Landscape Appreciation*. Disponível em http://wps.prenhall.com/esm_mcknight_physgeo_9/84/21603/5530451.cw/index.html. Acesso em 16 de outubro de 2012.

Menezes, L., 2004. *Mapeamento Digital de Análogos a Reservatórios Petrolíferos: Exemplo para Depósitos Fluviais da Unidade Açú-3 – Bacia Potiguar*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 118 p.

Miall, A.D., 1985, *Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits*. *Earth-Sci. Rev.*, 22: 261-308.

Miall, A. D. 1996. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Berlin, Springer-Verlag, 582 p.

Milani, E. J., Melo, J. H. G. de, Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, B. A. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov. 2007.

Monico, J. F. G., Póz, A. P. Dal, Galo, M.; Santos, M. C. dos, Oliveira, L. C. de. 2009 Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n3, p. 469-483.

Neal, Adrian. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, v. 66, p. 261–330, 2004.

Neto, P. X., 2006. *Processamento e Interpretação de Dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no Imageamento de Feições Kársticas e Estruturas de Dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda Belém - CE*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 176 p.

Olhoeft, G. R. 1998. Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. *Proceedings of GPR'98, Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar*. University of Kansas, Lawrence, KS, p. 177–182.

Oliveira, C. de. 1983. *Dicionário Cartográfico*. Rio de Janeiro. IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) 164p. 1983.

Paim, P. S. G., Faccini, U. F., Netto, R. G., 2003 Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares - Estudo de Casos. In: Paim, P. S. G., Garcia, A. J. V., Faccini, U. F. & Lavina, E. L. C. (eds.) *GEOARQ: Uma Abordagem Integrada e Aplicada da Geologia Sedimentar*. UNISINOS. Programa de Pós-Graduação em Geologia, p.:15-25.

- Pimentel, G. B. & Godoy, H. K. 1983. Projeto na área Leão-Mariana Pimentel, RS. DNPM – CPRM. 154p.
- Porsani, J. L. 2011. Método GPR: Aplicações em Geologia, Geotecnia, Meio Ambiente e Planejamento Urbano. *XIII Escola de Verão de Geofísica*. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 1-38.
- Powers, M. H. 1997. Modeling frequency-dependent GPR. *The Leading Edge*, v.16, p. 1657–1662.
- Pringle, J. K., Westerman, A. R., Clark, J. D., Drinkwater, N. J., Gardiner, A. R. 2004. *3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK*. *Petroleum Geoscience*, 10, 343–352.
- Reynolds, J. M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane. Chichester. West Sussex PO19 1UD. England, pp. 681-749.
- Rivas, R. A. N., Brito, J. L. N. S. 2003. A Tecnologia LASER Scanning: Uma Alternativa para o Mapeamento Topográfico. In: *XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte*. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia (XXI CBC). São Paulo : Monferrer Produções Gráficas Digitais, 2003. v. 1.
- Rodrigues, S. I., 2004. *Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 102 p.
- Rotevatn, A., Buckley, J. S., Howell, J. A., Fossen, H. 2009. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation. *Journal The American Association of Petroleum Geologists. Geological Society of América*. *Geosphere*, March 2009, v. 93, no. 3, p. 407-427, DOI: 10.1306/09300807092.
- Rust, B. R. 1978. A classification of alluvial channel systems. In: Miall AD (ed) *Fluvial sedimentology*. Calgary, Alberta, Canadian Society of Petroleum Geology. p. 187-198. (CSPG Memoir, 5).
- Scherer, C. M. S. 2008. Ambientes Fluviais. In: A. J. Pedreira, M. A. N. F. de Aragão, A. J. C. Magalhães (Org.) *Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil*. São Paulo, Brasil. Editora Beca, p.: 102-131.
- Schneider, R. L., Muhlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R., Daemon, R. F., Nogueira, A. A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 28, Porto Alegre. Anais XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre, v.1, p. 41-65.
- Schumm, S. A. 1994. *Erroneous perceptions of fluvial hazards*. Elsevier, *Geomorphology*, 10, p. 129-138.
- SE, S. AND JASIOBEDZKI P. 2006. *Photo-realistic 3D Model Reconstruction*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA., May 1, 2006; 3076 - 3082.
- Silva Filho, B. C. 1974. Discordância entre Supergrupo Itararé e a Formação Rio Bonito no Estado do Rio Grande do Sul. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 28, Anais, v.2, p. 59-67.
- Silva, M. N.; Buck, A. L. B.; Lingnau, C.; Machado, A. M. L.; Neto, R. P. M.; Pesck, V. A. 2013. *Laser Scanner Terrestre para Medições Florestais – Princípios e Aplicações*. In: *Revista Brasileira de Cartografia*. Rio de Janeiro, n.º 65/6, p. 1143-1152.
- Silva, R. M. da, Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Jacobi, L., Lamberty D. 2011. Digital Outcrop Model at Geological Analysis and Interpretation: Case Study Based on Data from Terrestrial Laser Scanner 3D – *FIG Working Week 2011 - Bridging the Gap between Cultures*. Marrakech, Morrocos, 18-22 Maio 2011.

- Silva, R. M. da, Inocencio, L. C. , Lamberty, D., Jacobi, L., Tognoli, F. M. W., Veronez, M. R. 2012. LIDAR as an Efficient Tool for 3D Geological Models. *Coordinates Magazine*, v. VIII, p. 14-16, 2012.
- Silveira, A. S. 2000. *Estratigrafia de Sequências e Evolução Paleoambiental da Sucessão Permiana (Sakmario – Eokaziano) da Bacia do Paraná, entre Rio Pardo e Mariana Pimentel (RS)*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 140 p.
- Smaniotto, L. P.; Fischer, T. V.; Souza, P. A.; Iannuzzi, R. 2006. Palinologia do Morro do Papaléo, Mariana Pimentel (Permiano Inferior, Bacia do Paraná), Rio Grande do Sul, Brasil. *Rev. Bras. Paleontologia*, 9(3): 311-322.
- Souza, A. M. 2013. *Proposta metodológica para o imageamento, caracterização, parametrização e geração de modelos virtuais de afloramentos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 151p.
- Teixeira, A. L. & Christofoletti, A., 1997. *Sistemas de Informação Geográfica (Dicionário Ilustrado)* – Editora Hucitec, 244p.
- Teixeira, W. L. E. 2008. *Aquisição e construção de modelos estáticos análogos a reservatórios petrolíferos com tecnologia LIDAR e GEORADAR*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 99p.
- Tognoli, F. M. W. 2006. *Estratigrafia das Sequências Depositionais do Grupo Guatá na Borda Leste da Bacia do Paraná*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 120p.
- Tommaselli, A. M. G. 2003. *Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a curta Distância*. UNESP Presidente Prudente, 2003. Disponível em <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/2003/04.1/AT2003.htm#1>. Acesso em 28 de setembro de 2009.
- Thurmond, J. B., Drzewiecki, P. A., XU, X. 2005. *Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML)*. Computers and Geosciences, 31, 913–919.
- White, P. D. & Jones, R. R. 2008. *A cost-efficient solution to true color terrestrial laser scanning*, Geosphere, June 1, 2008, 4(3): 564 - 575.
- Wildner, W., Ramgrab, G. E., Lopes, R. da C., Hoff, R., Inglesias, C. M. F. 2003. *Mapa Geológico do Rio Grande do Sul*, escala 1:750.000, CPRM. Porto Alegre - RS. 1CD.
- Wutke, J. D. 2006. *Métodos para Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 98p.
- Wutke, J. D., Centeno, J. A. S. 2007. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 13, p. 151-164.
- Zahm, C. K. & Hennings, P. H. 2009. Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming. *Journal The American Association of Petroleum Geologists. Geological Society of América*. Geosphere, August 2009, v. 93, no. 11, p. 1427-1446, DOI: 10.1306/080400909110.

CAPÍTULO 2: ACCURACY ANALYSIS OF DIGITAL OUTCROP MODELS OBTAINED FROM TERRESTRIAL LASER SCANNER (TLS)

Abstract The analysis, description and interpretation of outcrops are mainly based on field activities from which geoscientists can make observations, descriptions and sketches in field books as well as acquisition of digital photographs and different measurements with compass and other equipments. The development of geotechnologies in the last decade has been crucial in obtaining geological data directly in digital format and has contributed to save time and to better integrate the various types of data. The aim of this work is to quantify the positional error of an outcrop mapped by the LIDAR technique. Data acquisition was performed by the Terrestrial Laser Scanner supported by georeferenced points with a GNSS-GPS receiver. Using field data, it was possible to generate the Digital Outcrop Model (DOM), which permitted accurate visualization, measurement, and interpretation of geological characteristics. It was observed that the differences were not significant between the control data, measured with Total Station, and data acquired with a Terrestrial Laser Scanner (TLS). The interpretations allowed us to model the position of the top of a coal bed using interpolation between two of the outcrop walls. A field validation was performed to ensure the quality of the methodology proposed for this type of analysis. Thus, we conclude that DOMs obtained from TLS have high correlation coefficient in comparison with standard methods (e.g. Total Station), supporting high accuracy in this type of models independently of the access conditions in the outcrop.

Keywords *Digital Outcrop Models, Geological Interpretation, GPS, Terrestrial Laser Scanner*

2.1 INTRODUCTION

The increasing advance of the geotechnologies has generated new opportunities in the field of geosciences. Since the 2000's the use of digital mapping technologies has grown considerably, in particular the use of Terrestrial Laser Scanner (TLS) (Xu *et al.*, 2001; Bellian *et al.*, 2005; Alfarhan *et al.*, 2008). This technique has substituted the old-fashioned photographic mosaics routinely used for visualization and interpretation of large outcrops and has supported a number of different approaches about digital outcrop modeling. The Laser Scanning is capable to acquire georeferenced 3D data by means of mobile mirror or prisms and a laser beam and provide accurate data for topographic reconstructions and digital models.

The use of TLS in studies of outcrops has expanded in the last years due to the facility and fastness to acquire precise georeferenced data. The topics of interest are quite diverse, including methodological approaches (Bellian *et al.*, 2005; Abellán *et al.*, 2006; Enge *et al.*, 2007; Buckley *et al.*, 2008; Ferrari *et al.*, 2012), reservoirs (Pringle *et al.*, 2004; Phelps & Kerans, 2007; Jones *et al.*, 2008; Rotevatn *et al.*, 2009; Enge & Howell, 2010; Fabuel-Perez *et al.*, 2009, 2010), fractured rocks (Bellian *et al.*, 2007; Olariu *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2009; Zahm & Hennings, 2009; Souza *et al.*, 2013), erosion rates (Wawrzyniec *et al.*, 2007), synthetic seismic model (Janson *et al.*, 2007), orientation of basaltic lava flows (Nelson *et al.*, 2011) and classification of spectral patterns (Inocencio *et al.*, 2014).

Georeferenced database are close-dependent of the Global Navigation Satellite System (GNSS). The quality of such data are directly related with the positional quality of the tridimensional digital outcrop models generated from data derived from TLS. This fact is particularly important because a digital outcrop model might be a product of different database (e.g., ground penetration radar, terrestrial laser scanner, total station etc). Thus, geoscientists must consider accuracy as a fundamental criteria of integration among different database in order to generate high-quality 3D models. The goal of this study is to quantify the positional error associated with data acquired with TLS and to discuss its impact on the quality of 3D geological models.

2.2 MATERIAL AND METHODS

The study area comprises an outcrop located in the municipality of Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul State, southern Brazil. In the Morro do Papaleo crops out a coal-bearing succession of the Rio Bonito Formation, Lower Permian of the Paraná Basin (Figure 2.1). It is located among the geodetic coordinates (latitudes $30^{\circ}18'10''\text{S}$ and $30^{\circ}18'40''\text{S}$, longitudes $51^{\circ}28'20''\text{W}$ and $51^{\circ}38'20''\text{W}$), datum SIRGAS2000. This outcrop represents an abandoned kaolin quarry with a good exposure of different rocks such as fossiliferous siltstone, carbonaceous siltstone, kaolinic pebbly mudstone and coarse to conglomeratic sandstone (Figure 2.2).

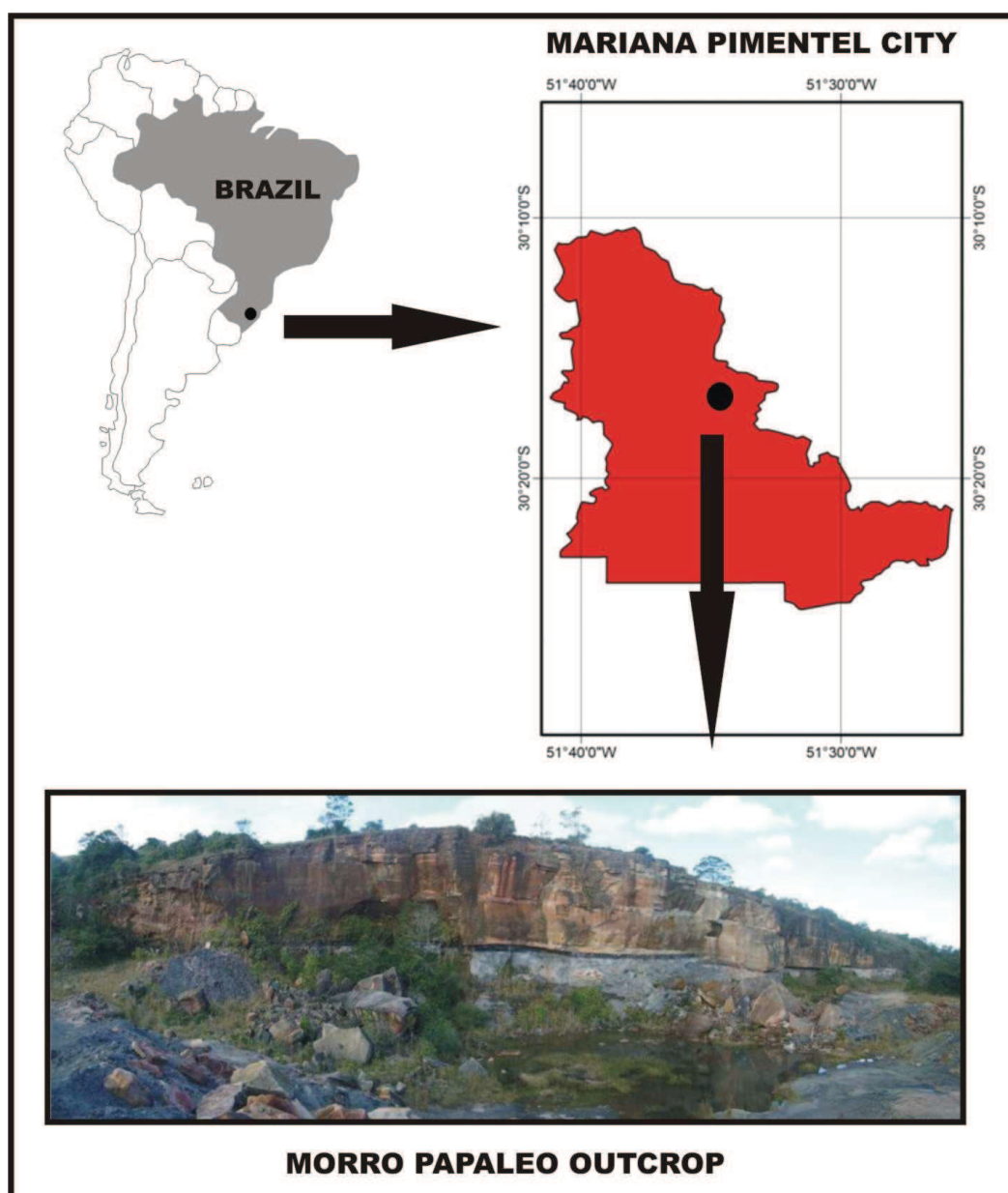


Figure 2.1 - Location of Study Area.

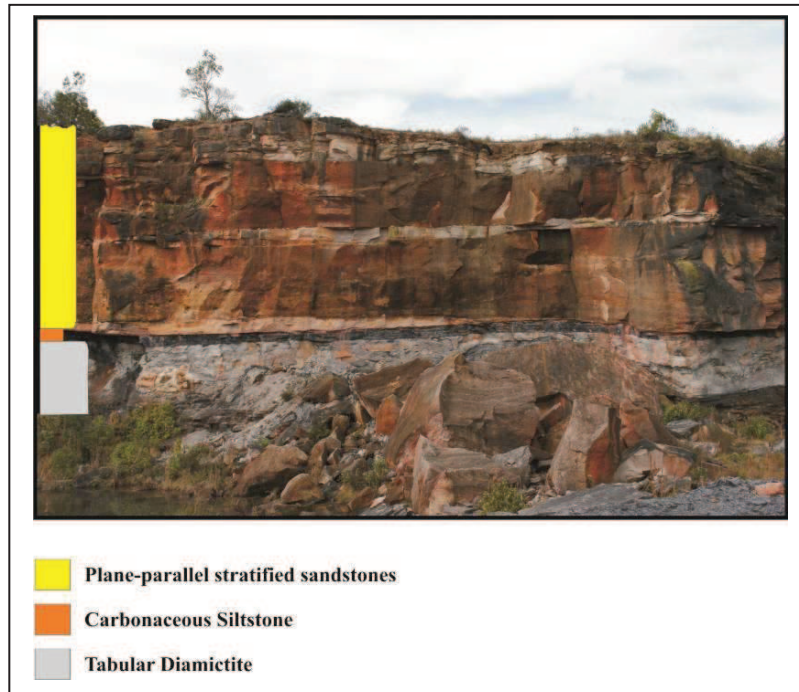


Figure 2.2 - Part of the west side of Morro Papaléo outcrop in Mariana Pimentel city. Note the lithological log.

One geodetic mark which served as support for the georeferencing of the point clouds obtained by TLS was firstly implanted on the top of the outcrop. Two georeferenced points were tracked with Hyper-RTK GNSS equipment using the geodetic mark as a reference (Figure 2.3A). These georeferenced points (Table 2.1) were used as a support for measuring coordinates of several points in the outcrop using Total Station Leica Viva TS-15 and also to calculate the positional error.

UTM COORDINATES			
POINTS	E (m)	N (m)	Ellipsoidal height – h (m)
P1	438125,808	6646812,115	136,775
P2	438135,602	6646873,338	137,468

Table 2.1 - Plane coordinates in UTM projection of the surveying support points, Central Meridian at 51°W - SIRGAS2000 Reference System (Geocentric Reference System for the Americas).

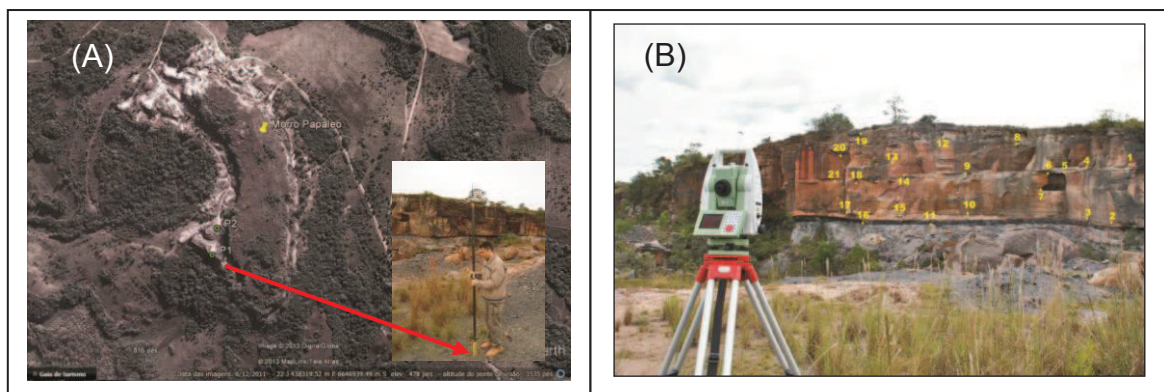


Figure 2.3- Geodetic data acquisition in the outcrop. (A) Tracking of points P1 and P2 with the use of GNSS-RTK. (B) Points measured with total station.

As a criterion for selection of points, color contrast and unequivocal physical characteristics on the outcrop were chosen for measurements. This procedure was crucial to identify the same points in the point cloud. We measured a total of 21 points of the outcrop surface, as illustrated in the Figure 2.3. These coordinates were used as a parameter for determining the positional quality of the studied outcrop. The TLS Leica Scanner Station C10 was used to acquire the point cloud with a resolution ranging between 2 mm and 4 cm (Figure 2.4).

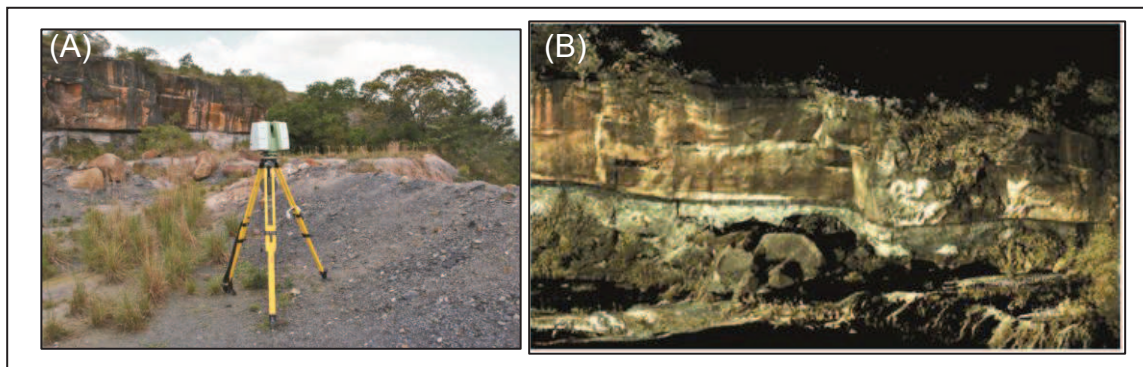


Figure 2.4 - Digital representation of the Morro Papaléo Outcrop. (A) TLS Leica Scann Station C10. (B) Point cloud acquired with the TLS.

2.3 RESULTS AND DISCUSSIONS

Field data were processed in the software Cyclone. In this step, a number of spurious data were removed of the point cloud, especially vegetation and fallen rocks in front of the outcrop. The field data were georeferenced with 21 control points which allowed to analyze the positional error. Table 2.2 shows the results obtained from the coordinates of the 21 points measured with total station and the TLS.

ID	Total Station			TLS point cloud			ERROR
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	LINEAR (m)
1	438167,809	6646815,668	145,5616	438167,8500	6646815,7100	145,5600	0,059
2	438168,0484	6646817,345	140,3815	438168,0100	6646817,3000	140,3800	0,059
3	438169,1769	6646819,65	140,8100	438169,1800	6646819,6300	140,7900	0,029
4	438169,6515	6646818,151	147,5608	438169,6500	6646818,1300	147,5600	0,021
5	438171,0883	6646822,08	145,7361	438171,0400	6646822,0600	145,6500	0,101
6	438170,5994	6646823,688	145,6885	438170,6500	6646823,6400	145,6800	0,070
7	438170,5904	6646824,459	144,0473	438170,5800	6646824,4500	144,0400	0,015
8	438169,8187	6646826,621	149,0989	438169,8300	6646826,5900	149,1000	0,033
9	438166,8273	6646831,059	145,8373	438166,8100	6646831,0700	145,8400	0,021
10	438167,2303	6646831,05	141,5598	438167,2200	6646831,0600	141,5400	0,024
11	438165,6669	6646834,704	140,4017	438165,6900	6646834,6900	140,4000	0,027
12	438164,475	6646832,524	149,4687	438164,4900	6646832,5400	149,4700	0,022
13	438163,7205	6646838,55	147,1102	438163,7200	6646838,5200	147,1100	0,030
14	438163,8878	6646837,122	145,3689	438163,9400	6646837,1200	145,3500	0,056
15	438164,0082	6646837,468	141,3125	438164,0100	6646837,4600	141,3100	0,009
16	438164,0356	6646842,716	140,6971	438164,0500	6646842,7200	140,6900	0,016
17	438163,2926	6646844,521	141,7660	438163,3000	6646844,5100	141,7600	0,014
18	438163,8241	6646843,506	145,2157	438163,8300	6646843,5000	145,2200	0,009

	Total Station			TLS point cloud			ERROR
19	438163,7537	6646843,073	151,1475	438163,6900	6646843,1000	151,1300	0,071
20	438163,6816	6646845,826	148,7649	438163,6600	6646845,8300	148,7600	0,023
21	438164,191	6646847,502	145,9879	438164,2000	6646847,4500	145,9600	0,059
Mean							0,037
Standard Deviation							0,025
Variance							0,001

Table 2.2 - Plane coordinates in UTM projection of the surveying support points, Central Meridian at 51°W - SIRGAS2000 Reference System (Geocentric Reference System for the Americas)

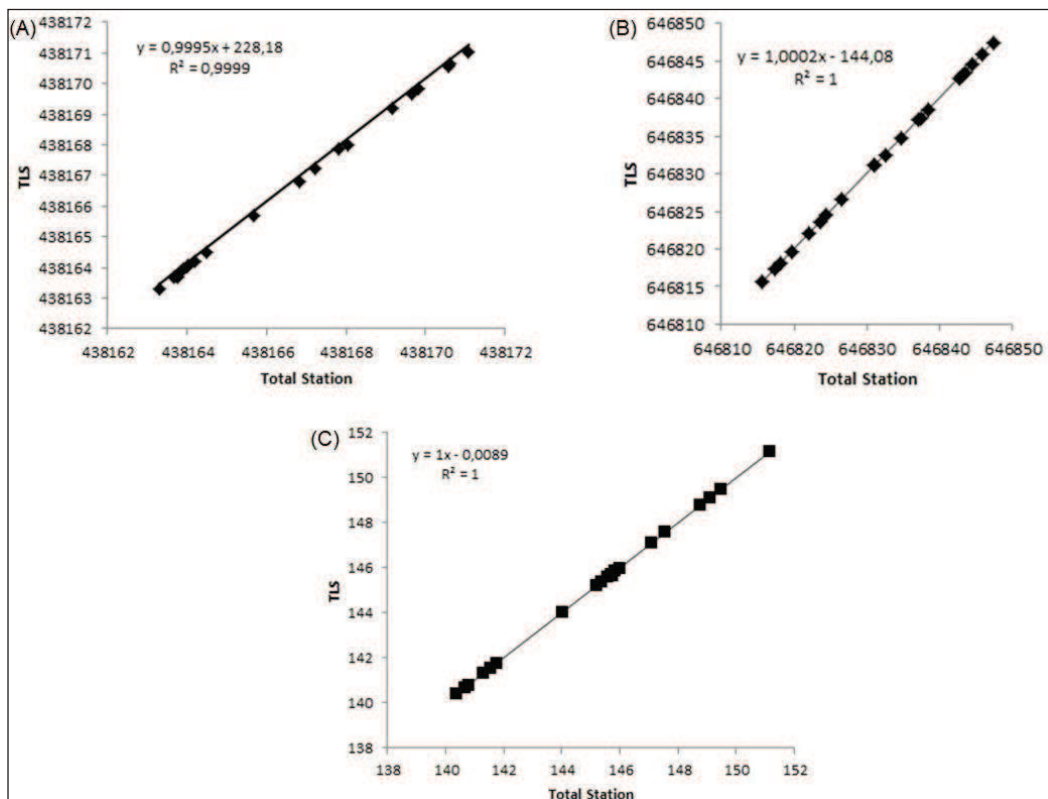


Figure 2.5 - Correlation between the measured coordinates with Total Station and TLS to East (A), North (B), and Height (C).

The Figure 2.5 shows a high correlation coefficient if compared with the measured coordinates, East (Figure 2.5A), North (Figure 2.5B), Height (Figure 2.5C) obtained with total station and TLS. The level of reliability of the Chi-Square test was done with 95% and results show that differences were not significative between the control data and those acquired with TLS.

Based on the digital outcrop model (Figure 2.6), measurements such as height, length and thickness were obtained. Furthermore, it was possible to identify important geological features such as bed geometry, lithology, sedimentary structures, fractures and faults. The field work was fundamental to identify and describe these features before identifying them directly on the point cloud or digital outcrop model.

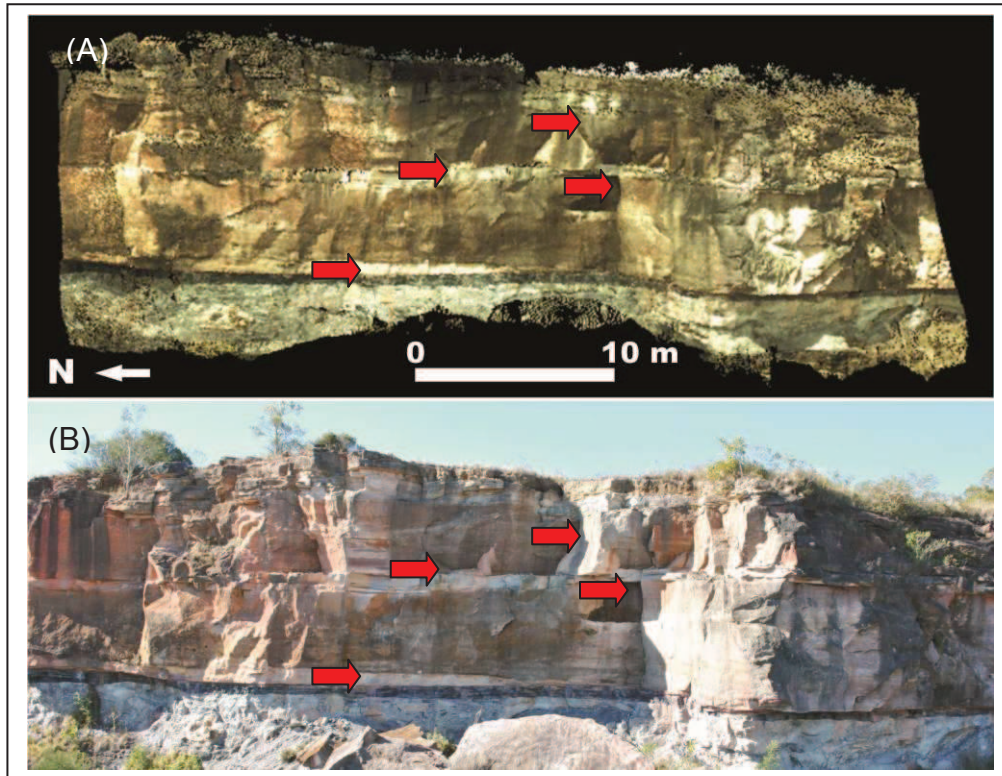


Figure 2.6 - Digital outcrop model. (A) Comparison between photomosaic and digital outcrop model. (B) Note the deformation of the compound photographs. Red arrows show features seen in both images.

The interpretation based directly on the DOM results in tridimensional geological interpretations expressed by 3D lines (vectors), as shown in the Figure 2.7. It is possible to observe the top of the carbonaceous siltstone both in digital outcrop models and field information (Figure 2.7). This vector was used as a parameter to generate the surface model using data obtained from the two faces of the outcrop, the west side (7A) and east side (7B). The coal bed generated by interpolation in modeling softwares (7C and 7D) can be integrated with other data, such as GPR (Ground Penetration Radar), total station, GNSS and other geophysics data.

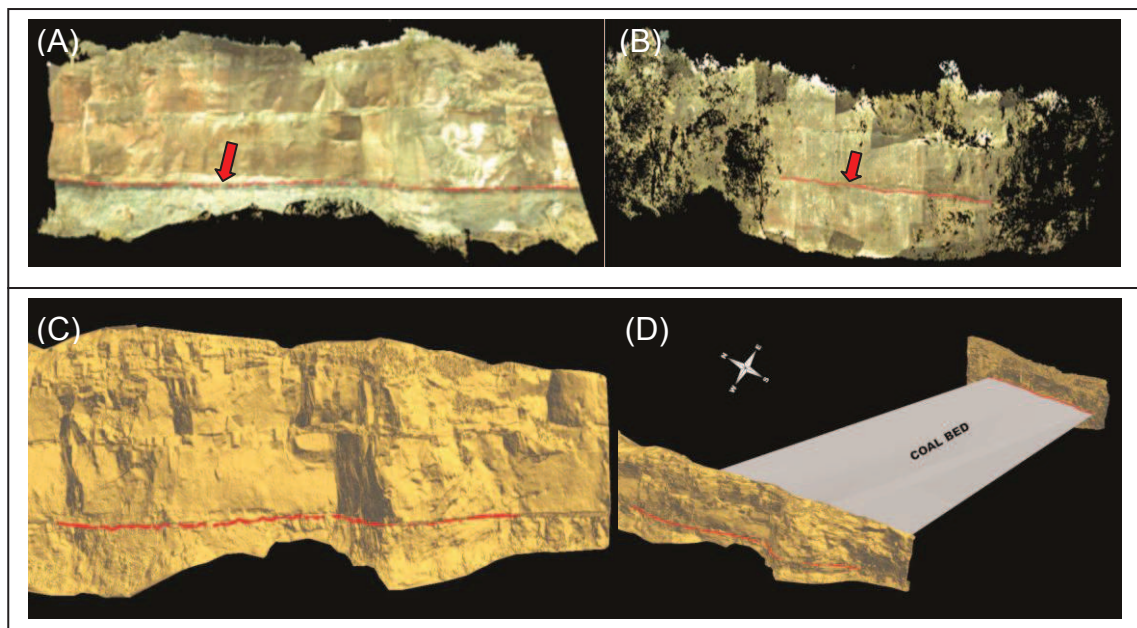


Figure 2.7 - Coal bed seen in both the west and east side of the outcrop. (A, B) Point cloud of the outcrop with the interpretation of the coal bed on the west side (A) and east side (B). (C) The coal bed generated from the interpretation in point cloud. (D) Triangulation of the point cloud (west side) with the interpolation of the coal bed.

2.4 CONCLUSIONS

This study has shown that LIDAR is an efficient technique for geological purposes. DOMs are efficient tools for assisting in the fieldwork planning as well as in the subsequent interpretation activities. The high resolution of the point cloud allows measurements of different geological features such as bed thickness, clast size, and fracture orientation. It was determined low values of standard deviation (2,5 cm) and variance (0,1 cm) between the control data, measured with Total Station, and those measured with TLS.

The geological interpretations are still limited because most of them are performed in CAD-based conventional softwares for manipulation and processing of the point clouds. Consequently, few tools are available for interpretation purposes and they seldom are developed considering the needs of geological studies. Moreover, large amounts of data have been an additional problem because of the central processing unit (CPU) limitations.

The development of computational routines both in hardware as in software are crucial to optimize the processing and interpretation of DOMs. A multidisciplinary research group involving Geology, Engineering and Graphic Computers has been working to improve data acquisition and processing of 3D visualization techniques, interpretation of geological features, and integration of the interpreted DOMs with different types of modeling software. High accuracy in the data acquisition will warrant the quality of the database that will be integrated with different data (e.g., GPR, total station, seismic etc) in multi-scalar approaches that can range from millimeters to hundred of meters.

2.5 ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Private Graduate Program (PROSUP) of CAPES, Bureau for the Qualification of Higher Education Students. This project was supported by FAPERGS, project "Modelos Digitais de Afloramentos como ferramenta na análise e interpretação geológica" (ARD – Process 10/0477-0) and FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), project "MODA - Modelagem Digital de Afloramentos Usando GPU" (MCT/FINEP – Pré-Sal Cooperativos ICT – Empresas 03/2010).

2.6 REFERENCES

- [1] Abellán, A. Vilaplana, J.M; Martínez, J. 2006. *Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at vall de núria (eastern pyrenees, spain)*. Eng Geol 88(3-4):136-48.
- [2] Alfarhan, M.; White, L.; Tuck, D.; Aiken, C. 2008. *Laser rangefinders and ArcGIS combined with three-dimensional photorealistic modeling for mapping outcrops in the Slick Hills, Oklahoma*. Geosphere, June 1, 4(3): 576 - 587.
- [3] Bellian, J. A.; Kerans, C.; Jennette, D. C. 2005. *Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling*. Journal of Sedimentary Research, 75:166–176.
- [4] Bellian, J. A., Jennette, D. C., Kerans, C., Gibeaut, J., Andrews, J., Yssldyk, B., and Larue, D., 2002. *3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology: American Association of Petroleum Geologists (AAPG)*. Search and Discovery Article 40056, (<http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>).

- [5] Buckley, S. J.; Howell, J. A.; Enge, H.D; Kurz, T.H. 2008. *Terrestrial Laser Scanning in Geology: Data Acquisition Processing and Accuracy Considerations*. Journal of the Geological Society, London; 2008, v. 165; ISSUE: 3, p. 625-638. DOI: 10.1144/0016-76492007-100.
- [6] Enge, H. D. & Howell, J. A. 2010. *Impact of deltaic clinothems on reservoir performance: Dynamic studies of reservoir analogs from the Ferron Sandstone Member and Panther Tongue, Utah*. AAPG Bulletin, February 1, 94(2): 139 - 161.
- [7] Enge, H. D.; Buckley, S. J.; Rotevatn, A.; Howell, J. A. 2007 *From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures*. Geosphere, December 1, 3(6): 469 - 490.
- [8] Fabuel-Perez, I.; Hodgetts, D.; Redfern, J. 2009. *A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco*. AAPG Bulletin, 93:795-827.
- [9] Fabuel-Perez, I.; Hodgetts, D.; Redfern, J. 2010. *Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology - workflow and implications for geological modelling: Oukaimeden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco)*. Petroleum Geoscience, May 1, 16(2): 133 - 154.
- [10] Ferrari, F.; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Inocencio, L. C.; Paim, P. S. G.; Silva, R. M. da 2012. *Visualização e Interpretação de Modelos Digitais de Afloramentos Utilizando Laser Scanner Terrestre*. Geociências (São Paulo. Online), v. 31, p. 79-91.
- [11] Inocencio, L. C. ; Veronez, M. R. ;Tognoli, F. M. W.; Souza, M. K. ; Silva, R. M. ; Gonzaga JR, L.; Silveira, C. L. B. . *Spectral Pattern Classification in Lidar Data for Rock Identification in Outcrops*. The Scientific World Journal, v. 2014, p. 1-10, 2014
- [12] Janson, X.; Kerans, C.; Bellian, J. A.; Fitchen, W. *Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas*. AAPG Bulletin, October 1, 2007; 91(10): 1405 - 1436.
- [13] Jones, R. R.; Mccaffrey, K. J. W.; Imber, J.; Wightman, R.; Smith, S. A. F.; Holdsworth, R. E.; Clegg, P.; Paola, N. De; Healy, D.; Wilson, R. W. 2008. *Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues*. Geological Society, London, Special Publications, January 1, 309(1): 87 - 98.
- [14] Jones, R. R., Kokkalas, S., Mccaffrey, K. J. W. 2009. *Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR)--The Arkitsa fault, central Greece, as a case study*. Geosphere, December 1, 2009; 5(6): 465-482.
- [15] Nelson, C. E.; Jerram, D. A.; Hobbs, R. W.; Terrington, R.; Kessler, H. 2011. *Reconstructing flood basalt lava flows in three dimensions using terrestrial laser scanning*. Geosphere, February 1, 1; 7(1): 87 - 96.
- [16] Olariu, M. I.; Ferguson, J. F.; Aiken, C. L. V.; Xu, X. *Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas*. Geosphere, February 1, 2008; 4(1): 247 - 259.
- [17] Phelps, R. M. & Kerans, C. 2007. *Architectural Characterization and Three-Dimensional Modeling of a Carbonate Channel Levee Complex: Permian San Andres Formation, Last Chance Canyon, New Mexico, U.S.A*. Journal of Sedimentary Research, November 1, 77(11): 939 - 964.
- [18] Pringle, J.; Gardiner, A.; Westerman, R. 2004. *Virtual geological outcrops-fieldwork and analysis made less exhaustive?* In: *Geology Today*, 20:67-72.

- [19] Rotevatn, A.; Buckley, J. S.; Howell, J. A.; Fossen, H. 2009. *Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study*. AAPG Bulletin, 93:407-427-11.
- [20] Souza, M. K.; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Silveira JR., L. G. ; Inocencio, L. C.; Silva, R. M.; Modena, R. C. C.. *Terrestrial Laser Scanning: Application for Measuring of Structures Information in Geological Outcrops*. International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, v. 2, p. 260-270, 2013.
- [21] Wawrzyniec, T. F.; Mcfadden, L. D.; Ellwein, A.; Meyer, G.; Scuderi, L.; Mcauliffe, J.; Fawcett, P. *Chronotopographic analysis directly from point-cloud data: A method for detecting small, seasonal hillslope change, Black Mesa Escarpment, NE Arizona*. Geosphere, December 1, 2007; 3(6): 550 - 567.
- [22] Xu, X.; Bhattacharya, J. B.; Davies, R. K.; Aitken, C. L. V. 2001. *Digital Geologic Mapping of the Ferron Sandstone, Muddy Creek, Utah, With GPS an Reflectorless Laser Rangefinders*. GPS Solutions, 5:15-23.
- [23] Zahm, C. K. & Hennings, P. H. 2009. *Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming*. Journal The American Association of Petroleum Geologists. Geological Society of América. Geosphere, August 2009, 3(11) :1427-1446, DOI: 10.1306/080400909110.

CAPÍTULO 3: ACCURATE DIGITAL OUTCROP MODELS BASED ON IMAGE-BASED MODELING

Abstract: The work presented in this paper aim at analyzing the accuracy in the positioning of point clouds of outcrop obtained both 3D reconstruction from photo and LIDAR using Terrestrial Laser Scanner (TLS). To achieve this, the Morro Papaléo outcrop within the Rio Bonito formation, located in the Mariana Pimental city in Rio Grande do Sul State, has been chosen as case study. To make the comparison possible, the used dataset is composed of photos taken from a digital camera, point clouds acquired by terrestrial laser scanner, and positioning measurements obtained with GNSS and Total Station. As a result, it was obtained an average of 37.5 cm error in positioning the 3D reconstruction, with a standard deviation of 13.7 cm between the 21 points used. The differences of the relative error in linear measurements between 3D reconstruction from photos and TLS were smaller than 5 cm, showing that 3D reconstruction from photos can be used in digital modeling of outcrops.

3.1 INTRODUCTION

The increasing advancement in new technologies has generated new opportunities, which have not yet been explored in the field of geosciences. Thus it is scientifically necessary to test and evaluate the best possible ways to use these technologies. Now in geology, we have efficient tools to obtain three-dimensional (3D) data that include color and intensity, which allows accurate measurement of thickness of layers in places of difficult access. Three-dimensional digital models, especially those obtained from terrestrial laser scanner, have various applications. In Brazil, there are few studies that discuss the benefits, the working methods, and the applications of these tools (Freire, 2006; Barchik *et al.*, 2007; Wutke & Centeno, 2007; Teixeira, 2008; Centeno *et al.*, 2010; Jacobi *et al.*, 2010).

One technique that has quickly evolved is georeferenced geological information by the System GNSS (Global Navigation Satellite System). This system has allowed more efficient, both in accuracy and in time gain, integration of the different products in a efficient single geological reference system, ensuring greater reliability in the processes of generation of three-dimensional geological models (Pringle *et al.*, 2004; Thurmond *et al.*, 2005; White & Jones, 2008).

The use of digital mapping technologies have grown in the last ten years in particular the use of terrestrial laser scanner and topography equipments integrated systems with satellite navigation and geographic information (Xu *et al.*, 2001; Alfathan *et al.*, 2008) thus replacing photographic mosaics routinely used in the interpretation of large outcrops.

Terrestrial laser scanners are able to capture few hundreds of millions of georeferenced points. This device, to define three dimensional coordinates of points on a surface, emits laser pulses with the aid of a scanning mirror. When a pulse hits an object a portion of the energy returns back to the equipment. The distance between the sensor and the object is measured based on the time lag between emission and return of the pulse. The calculation of the coordinates of each point, obtained by the laser scanner, is possible from a point with known coordinates in the source pulse. Thus, the study of outcrops gets a new impulse by the ability to quantify the data estimated or ignored due to lack of access.

The use of LIDAR technology, especially terrestrial laser scanner, in studies of outcrops is expanding due to the ease of acquisition of precise, fast and automated georeferenced data. This technology is being used for this purpose from a decade (Bellian *et al.*, 2002), but only in recent years the number of scientific articles have increased significantly. However, the topics of interest are quite diverse, and include: methodological approaches (Aguilera *et al.*, 2007; Bellian *et al.*, 2005; Enge *et al.*, 2007; Buckley *et al.*, 2008; Ferrari *et al.*, 2012), reservoirs (Pringle *et al.*, 2004; Phelps & Kerans, 2007; Kurtzman *et al.*, 2009; Rotevatn *et al.*, 2009; Enge & Howell, 2010; Fabuel-Perez *et al.*, 2009,2010), fractured rocks (Bellian *et al.*, 2007; Olariu *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2009; Zahm & Hennings, 2009; Souza *et al.*, 2013), erosion rates (Wawrzyniec *et al.*, 2007), synthetic seismic model (Janson *et al.*, 2007), orientation of basaltic lava flows (Nelson *et al.*, 2011) and classification of spectral patterns (Inocencio *et al.*, 2014).

Another technique that has been used is the creation of photo reality in three-dimensions (3D) by the application of calibration models obtained in scenes with the use of hand cameras. According to Se & Jasiobedzki (2006), calibration models for application in reality photo will be a subject of research for many years. These models allows the creation of 3D models, both for visualization and measurements, which have applications in various fields. Several studies (Leung, 2006; Camargo, 2008 and Aliaga *et al.*, 2007) have used photogrammetry technique for reconstruction of 3D models, and have analyzed the effects and methods for image-based modeling from multiple images. In geology, this technique can be applied in the 3D analysis of outcrops to improve and facilitate laboratory interpretation (Baltsavias *et al.*, 2001; Enge *et al.*, 2007).

Thus the aim of this study is to quantify, from control points, the positional error of outcrops mapped by the technique of image based modeling and make a comparison of the positional error by LIDAR technique.

3.2 3D RECONSTRUCTION MODEL FROM MULTIPLE IMAGES

Using multiples images (photographs), we can (re)construct three-dimensional models. It is the reverse process of obtaining photographs from 3D scenes, when a 3D scene is projected in 2D (i. e., image), plane and depth are lost. A 3D point corresponding to a specific image point is constrained to be on the line of sight. From a single image, it is impossible to determine a point on the line of sight that corresponds to the image point. However if two images are available, then the position of a 3D point can be found at the intersection of the two projection rays. This process is called triangulation. Therefore, this process requires the multiple pass approach, that begins from camera calibration process to relate measuring range of the sensor with the real world quantity that it measures. It is necessary first to understand the mathematical model of a camera to calibrate it. For this purpose, we have adopted a *projective camera* model (pinhole camera), which has been widely adopted as camera model in computer vision, since it is simple and enough accurate enough for most applications.

The pinhole camera is illustrated in Figure 3.1 (A), while a slightly different model, where image plane is on front of the center of projection, is expressed in Figure 3.1 (B).

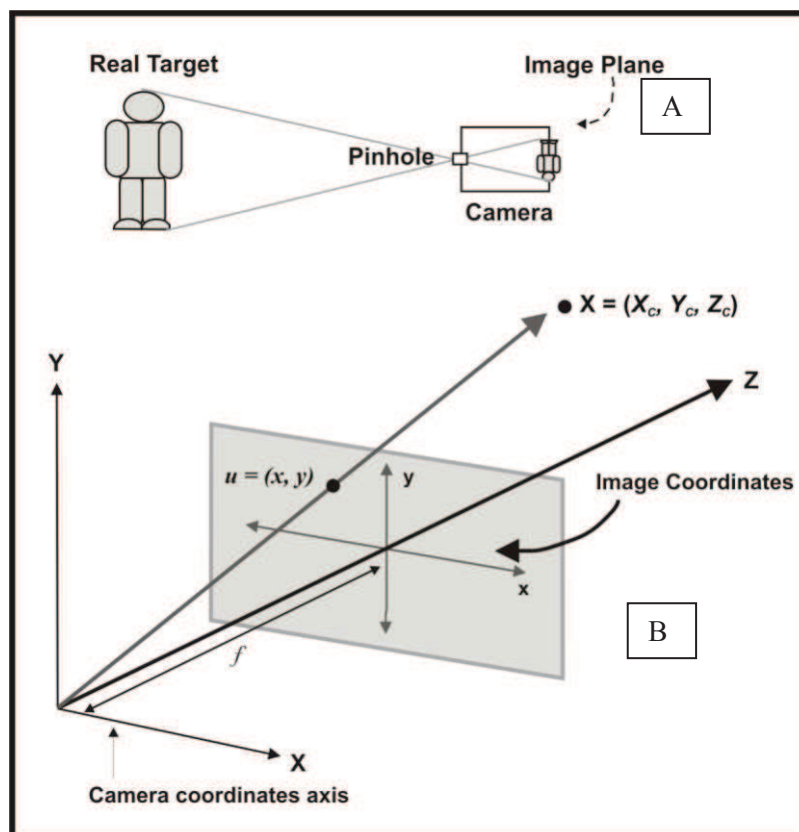


Figure 3.1 – Pinhole camera (A), Model (B)

To understand multi-view geometry, first of all we have considered relationship between two cameras (or sequentially moving one camera), which is actually **epipolar geometry**. The epipolar geometry is the geometry of intersecting planes of images. Using the common points between the images, along with the intersection of planes, it is possible to calculate the 3D position of objects in the scene.

We have show that there is a geometric relationship between corresponding points in two images of the same scene. This relationship depends only on the intrinsic parameters of the two cameras and their relative translation and rotation Figure 3.2.

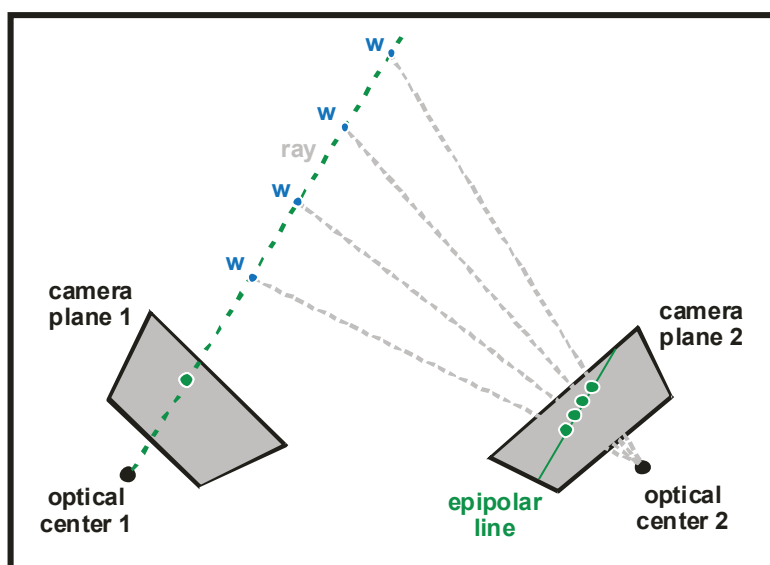


Figure 3.2 – Two cameras with epipolar constraints

Consider a single camera viewing a 3D point $\mathbf{w}$ in the world, passing through $\mathbf{x}_1$ and optical center $\mathbf{c}_1$. From one camera, it is impossible to identify the point in the ray. The projection of the ray in image plane 2 defines an *epipolar line*. Therefore, the point in the first image plane (Camera 1) corresponds to a constrained line in the second image plane (Camera 2). This relationship is called as *epipolar constraint*. The constraint on corresponding points is a function of the intrinsic and extrinsic parameters. If intrinsic parameters are given, then the extrinsic ones can be determined, and so the geometric relationship between the cameras. Another advantage is that, given the intrinsic and extrinsic parameters of the cameras, corresponding point of one image can be found easily through a 1D search along the *epipolar line* in the other image.

A mathematical model can capture the relationship between two cameras (two images) and can provide 3D point determination. In a general context, the mathematical constraint between the positions of corresponding points $\mathbf{x}_1$ and $\mathbf{x}_2$ in two normalized cameras can be obtained by *essential matrix* (note that either camera calibration or a different matrix – fundamental matrix – is required). Details about essential matrix can be obtained from any good computer vision literature [X, Y, Z]. This matrix can provide the above described parameters, mainly the camera matrices (*resectioning process*) and their parameters. Using a series of 3D-2D image plane correspondences it is possible to compute camera pose estimation. It utilizes camera parameters of the right camera that minimize the residual error of the 3D-point reprojections.

In another approach three or more cameras, instead of two can be considered to image. In three views, there are six measurements and so three degrees of freedom. However, it is for lines that there is the more significant gain. In two-views the number of measurements equals the number of degrees of freedom of the line in 3D-space, i.e., four. Consequently, there is no possibility of removing the effects of measurement errors. However, in three views there are six measurements on four degrees of freedom, therefore a scene line is over-determined and can be estimated by a suitable minimization over measurement errors.

For the computing purpose, we have implemented this sequence of concepts in an in-house computer vision library, using OpenCV [W] – for computer vision and image processing support, Google Ceres-Solver library¹ – for modeling and solving large complicated nonlinear least squares problems and Eigen library² – a high-level C++ library of template headers for linear algebra, matrix and vector operations, and numerical solvers.

3.3 MATERIALS AND METHODS

3.3.1 Materials

The study area is an outcrop of the Rio Bonito Formation, Lower Permian of the Paraná Basin, called Morro Papaleo and located at Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul state, southern Brazil (Figure 3.3), between the geodetic coordinates, latitudes 30°18'10"S and 30°18'40"S and longitudes 51°38'40"W and 51°38'30"W in the datum SIRGAS2000. The mentioned area is an abandoned quarry originally exploited for kaolin. It is a three-dimensional outcrop with a good exposure of rocks such as fossiliferous siltstone, carbonaceous siltstone, pebbly mudstone and sandstone.

¹ <https://code.google.com/p/ceres-solver/>

² <http://eigen.tuxfamily.org>

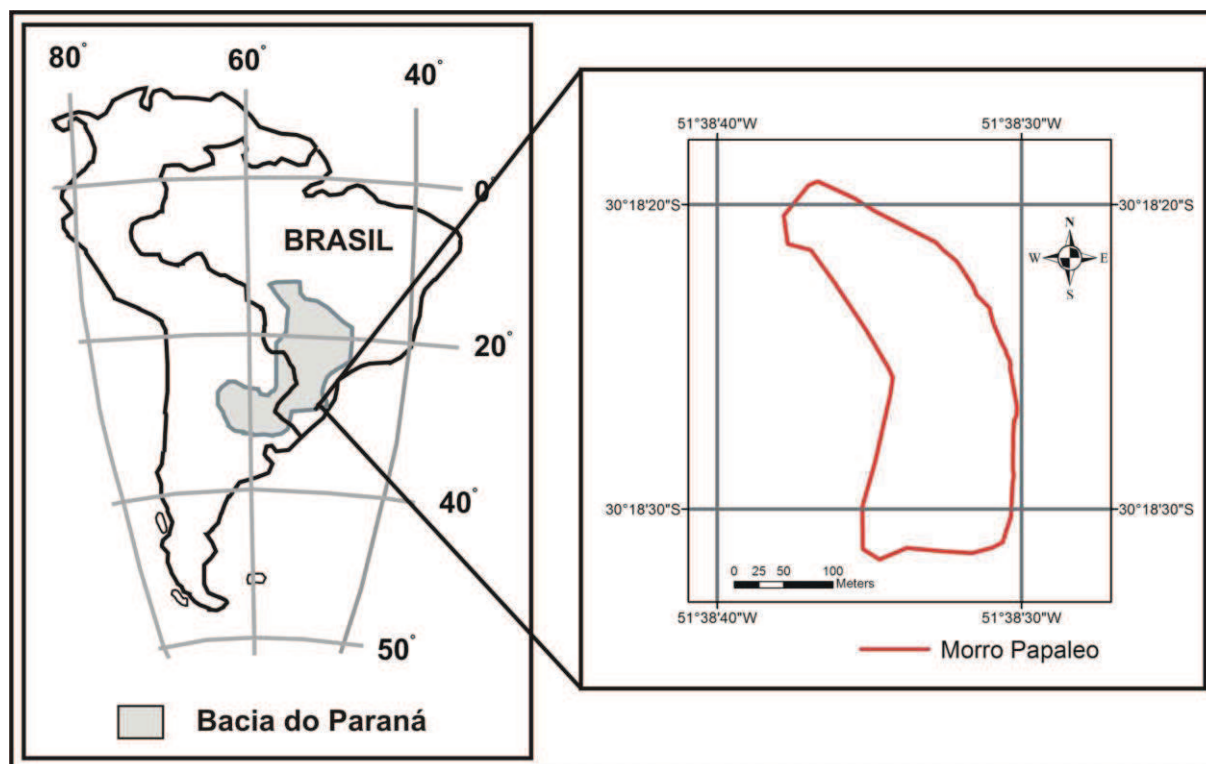


Figure 3.3 - Location map of the study area.

We implemented points serving as support for the georeferencing of the point clouds obtained by LIDAR as image-based modeling technique. The georeferenced points were tracked with Hyper-RTK GNSS equipment and were supported by Geodetic Mark, implanted on top of the outcrop. These georeferenced points (P1 and P2, Table 3.1) were used as a support for measuring coordinates of points on the surface outcrop, which subsequently, were used to analyze the positional error. As a result tracking points (P1 and P2) were obtained in the UTM system coordinates (Figure 3.3 and Table 3.1):

UTM COORDINATES			
POINTS	E (m)	N (m)	Ellipsoidal height – h (m)
P1	438125,808	6646812,115	136,775
P2	438135,602	6646873,338	137,468

Table 3.1 - Plane coordinates in UTM projection of the points of support for Surveying, Central Meridian at 51° SIRGAS2000 Reference System (Geocentric Reference System for the Americas).

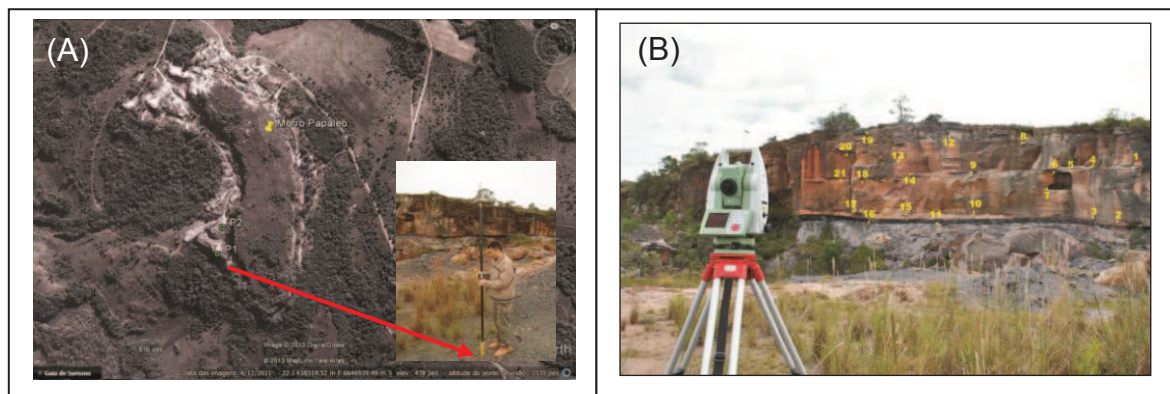


Figure 3.4 - Tracking of points P1 and P2 with the use of GNSS-RTK (A). Points of the surface outcrop measured with total station (B).

To obtain the coordinates on the surface of the outcrop we used a total station (Leica Viva TS15, Figure 3.4B), supported at points (P1 and P2) with GNSS-RTK.

It was adopted as a criterion for selection of local points emphasizing on the contrast of colors and other well-defined characteristics. This facilitated the identification of the point cloud, both in terrestrial laser scanner and image-based modeling.

With the total station, 21 points (Table 3.2) at the surface of the outcrop were measured, as illustrated in Figure 3.5 (B). These coordinates were used as parameters to determine the positional quality of the outcrop study.

UTM COORDINATES			
POINTS	E (m)	N (m)	Ellipsoidal height – h (m)
1	438167,809	6646815,668	145,5616
2	438168,0484	6646817,345	140,3815
3	438169,1769	6646819,65	140,8100
4	438169,6515	6646818,151	147,5608
5	438171,0883	6646822,08	145,7361
6	438170,5994	6646823,688	145,6885
7	438170,5904	6646824,459	144,0473
8	438169,8187	6646826,621	149,0989
9	438166,8273	6646831,059	145,8373
10	438167,2303	6646831,05	141,5598
11	438165,6669	6646834,704	140,4017
12	438164,475	6646832,524	149,4687
13	438163,7205	6646838,55	147,1102
14	438163,8878	6646837,122	145,3689
15	438164,0082	6646837,468	141,3125
16	438164,0356	6646842,716	140,6971
17	438163,2926	6646844,521	141,7660
18	438163,8241	6646843,506	145,2157
19	438163,7537	6646843,073	151,1475
20	438163,6816	6646845,826	148,7649
21	438164,191	6646847,502	145,9879

Table 3.2 – Coordinate measured with Total Station

For imaging the outcrop on Leica Scanner Station C10 was used with resolution point cloud ranging between 2mm to 4cm.

The point cloud was processed to eliminate spurious information such as vegetation and fallen rocks in front of the outcrop. In outcrop Morro Papaléo predominate sandstone Figure 3.5.

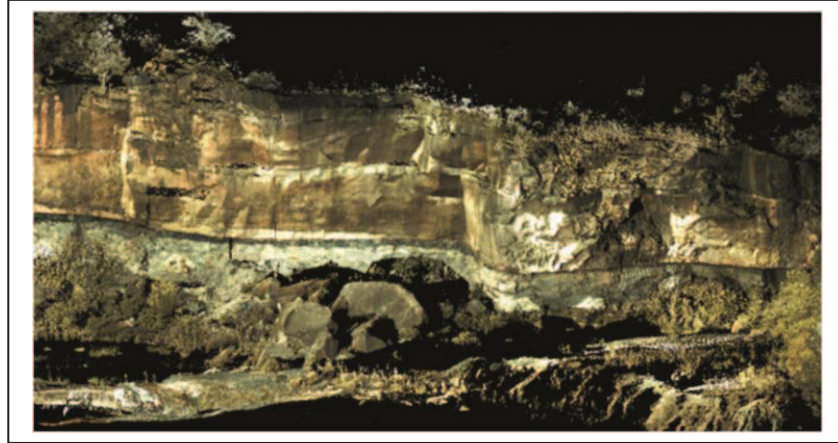


Figure 3.5 - Point cloud obtained with the terrestrial laser scanner (Silva *et al.*, 2014)

The same outcrop was photographed with a Nikon D3000 digital camera at a resolution of 7 Megapixels. The procedure for the collection of photos in the field was adopted to keep approximately the same distance between the camera and the outcrop (Figure 3.6). Another procedure was adopted to consider the top and bottom of the outcrop in the same photo. The photos were taken from different positions in order to obtain approximately 60% overlap between images.

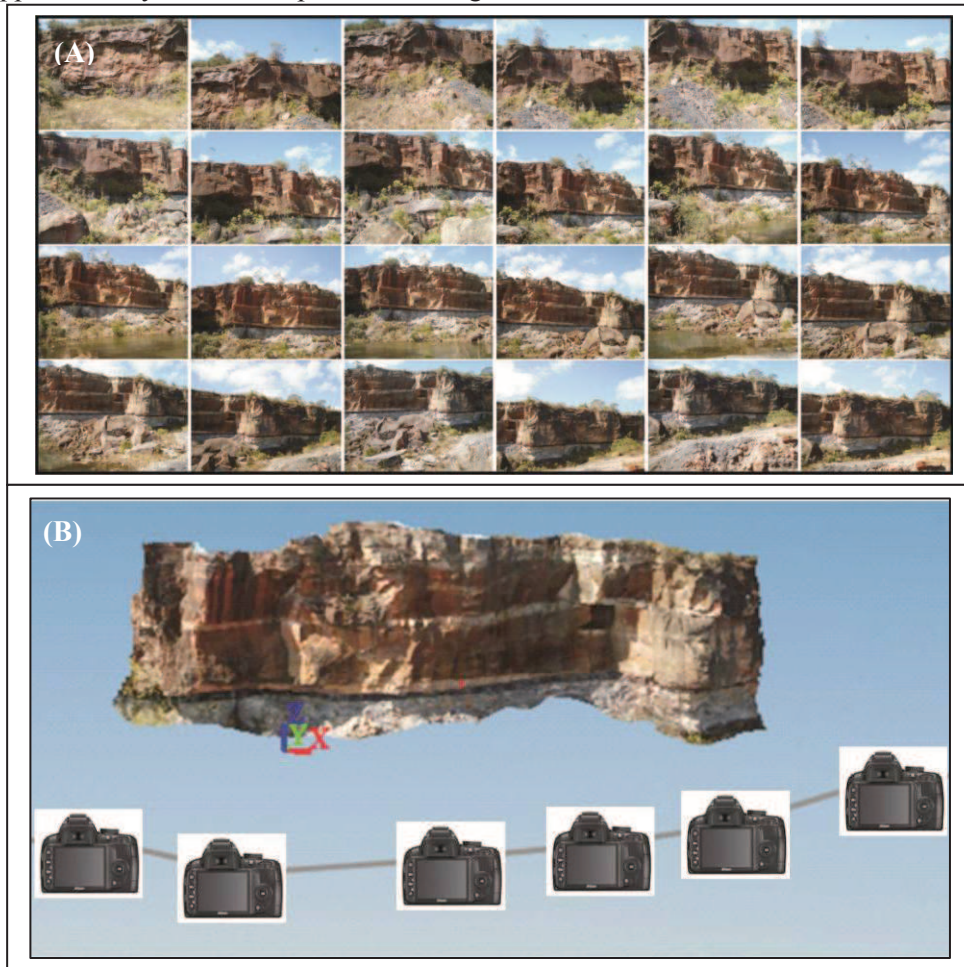


Figure 3.6 – Pictures obtained with the camera (A). Positions of camera (B).

The processing of digital photos and reconstruction of the outcrop were based on image-base modeling technique. We reconstructed the 3D outcrop and generated a cloud of points and georeference following the same procedures used in the generation of Digital Outcrop Model (DOM) obtained with the TLS.

3.4 RESULTS AND DISCUSSION

By comparing the results for the generation of DOMs, based on LIDAR technique and reconstruction of 3D objects from photos, it became evident that the image based modeling (Figure 3.7A) from photos allowed a visual resolution compatible with the LIDAR data. However, the model generated by terrestrial laser scanner (Figure 3.7B) allowed control of spacing (resolution) of the points in the point cloud, whereas, there is no such control in image-based modeling from photos.

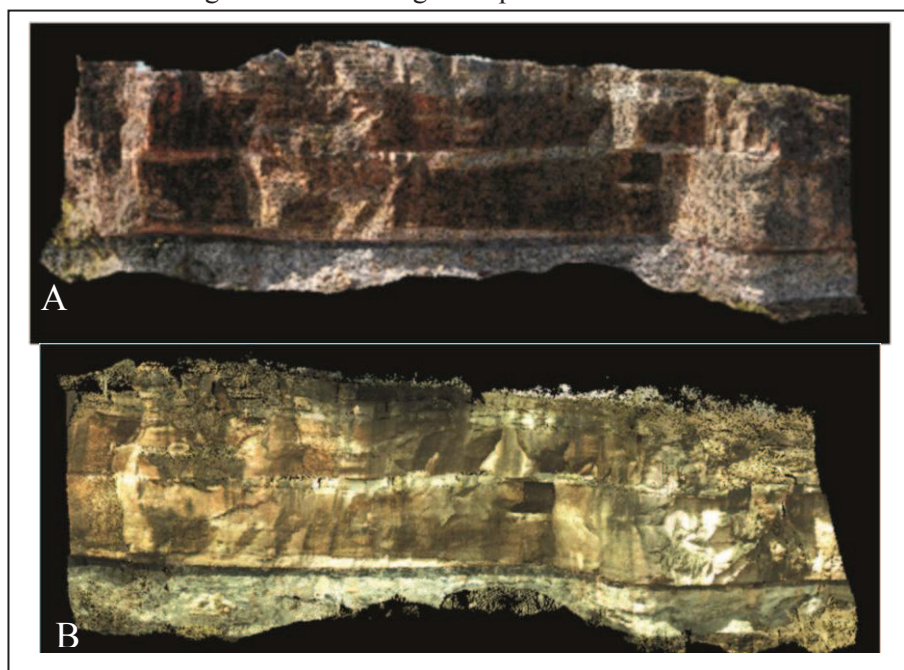


Figure 3.7 - 3D Reconstruction from photos (A) and terrestrial laser scanner (B).

Table 3.3 shows the results obtained from the coordinates of a point cloud of image-based modeling. It is used as a parameter to calculate positioning accuracy of the coordinates of the 21 points measured with the total station. The same parameter was used to compare the coordinates of the point cloud of the terrestrial laser scanner (Table 3.4).

ID	Total Station			Image-Based Modeling Point Cloud			Error
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	Linear (m)
1	438167,809	6646815,668	145,562	438168,317	6646815,962	145,763	0,620
2	438168,048	6646817,345	140,382	438168,322	6646817,171	140,707	0,459
3	438169,177	6646819,650	140,810	438169,638	6646819,446	141,048	0,558
4	438169,652	6646818,151	147,561	438170,035	6646818,166	147,585	0,385
5	438171,088	6646822,080	145,736	438171,051	6646821,980	145,882	0,181
6	438170,599	6646823,688	145,689	438170,883	6646823,583	145,882	0,360
7	438170,590	6646824,459	144,047	438170,851	6646824,384	144,248	0,338
8	438169,819	6646826,621	149,099	438170,222	6646826,707	149,151	0,416
9	438166,827	6646831,059	145,837	438167,111	6646830,935	145,882	0,313
10	438167,230	6646831,050	141,560	438167,399	6646830,902	141,626	0,234

ID	Total Station			Image-Based Modeling Point Cloud			Error
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	Linear (m)
11	438165,667	6646834,704	140,402	438165,649	6646834,615	140,452	0,104
12	438164,475	6646832,524	149,469	438165,043	6646832,543	149,509	0,569
13	438163,721	6646838,550	147,110	438164,041	6646838,354	147,074	0,378
14	438163,888	6646837,122	145,369	438164,126	6646836,870	145,457	0,358
15	438164,008	6646837,468	141,313	438164,177	6646837,552	141,388	0,203
16	438164,036	6646842,716	140,697	438164,259	6646842,447	140,554	0,378
17	438163,293	6646844,521	141,766	438163,694	6646844,344	141,763	0,438
18	438163,824	6646843,506	145,216	438164,121	6646843,336	145,184	0,344
19	438163,754	6646843,073	151,148	438164,119	6646843,025	151,075	0,375
20	438163,682	6646845,826	148,765	438163,878	6646845,885	148,606	0,259
21	438164,191	6646847,502	145,988	438164,367	6646847,095	145,576	0,605
				Mean			0,375
				SD			0,137
				Variance			0,019

Table 3.3 - Linear error of the image-based modeling point cloud.

ID	Total Station			TLS point cloud			Error
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	Linear (m)
1	438167,809	6646815,668	145,562	438167,850	6646815,710	145,560	0,059
2	438168,048	6646817,345	140,382	438168,010	6646817,300	140,380	0,059
3	438169,177	6646819,650	140,810	438169,180	6646819,630	140,7960	0,029
4	438169,652	6646818,151	147,561	438169,650	6646818,130	147,560	0,021
5	438171,088	6646822,080	145,736	438171,040	6646822,060	145,650	0,101
6	438170,599	6646823,688	145,689	438170,650	6646823,640	145,680	0,070
7	438170,590	6646824,459	144,047	438170,580	6646824,450	144,040	0,015
8	438169,819	6646826,621	149,099	438169,830	6646826,590	149,100	0,033
9	438166,827	6646831,059	145,837	438166,810	6646831,070	145,840	0,021
10	438167,230	6646831,050	141,560	438167,220	6646831,060	141,540	0,024
11	438165,667	6646834,704	140,402	438165,690	6646834,690	140,400	0,027
12	438164,475	6646832,524	149,469	438164,490	6646832,540	149,470	0,022
13	438163,721	6646838,550	147,110	438163,720	6646838,520	147,110	0,030
14	438163,888	6646837,122	145,369	438163,940	6646837,120	145,350	0,056
15	438164,008	6646837,468	141,313	438164,010	6646837,460	141,310	0,009
16	438164,036	6646842,716	140,697	438164,050	6646842,720	140,690	0,016
17	438163,293	6646844,521	141,766	438163,300	6646844,510	141,760	0,014
18	438163,824	6646843,506	145,216	438163,830	6646843,500	145,220	0,009
19	438163,754	6646843,073	151,148	438163,690	6646843,100	151,130	0,071
20	438163,682	6646845,826	148,765	438163,660	6646845,830	148,760	0,023
21	438164,191	6646847,502	145,988	438164,200	6646847,450	145,960	0,059
				Mean			0,037
				SD			0,025
				Variance			0,001

Table 3.4 – Linear error of the TLS point cloud (Silva *et al.*, 2014)

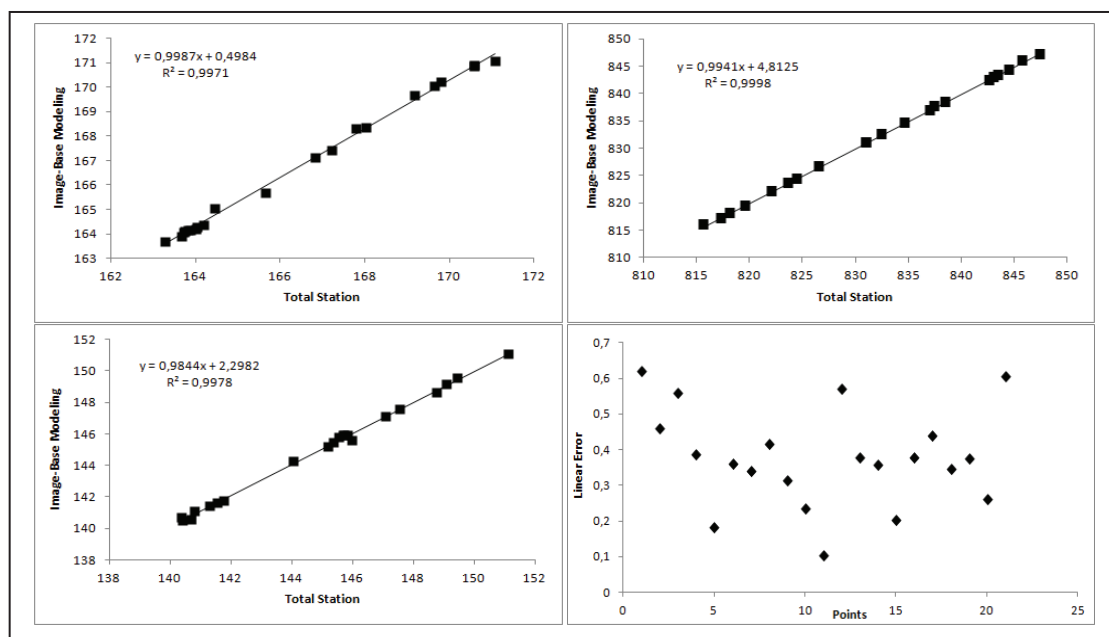


Figure 3.8- Correlation between the measured coordinates with Total Station and Image-Based Modeling to East (A), North (B), Height (C) and Linear Error (D).

Note: The construction of these graphs required subtraction of the values of the abscissa east (438000) and ordinate north (6646000) to further visualize the data.

The comparison between the measured coordinates with total station and image-based modeling is given in Figure 3.8 (A, B, C and D). The coefficients for the coordinates East (A), North (B) and Height (C) are above 99%, indicating a good fit between the data obtained with image-based modeling, but the averaged linear error (D) is 37,5 cm with a standard deviation of 13,7 cm.

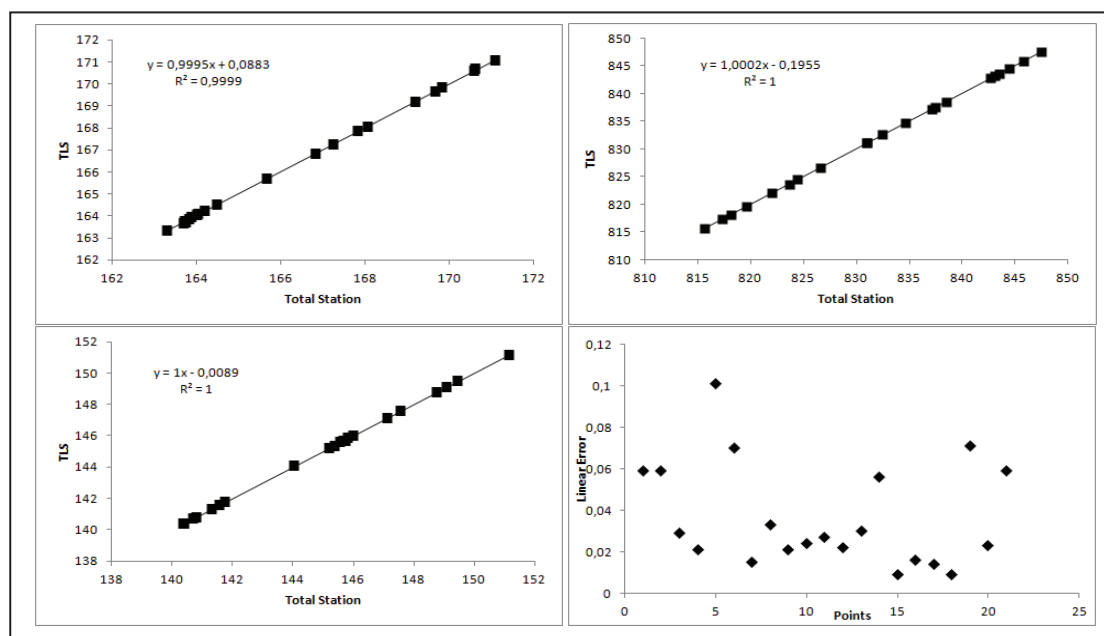


Figure 3.9 - Correlation between the measured coordinates with total station and TLS to East (A), North (B), Height (C) and Linear Error (D).

Note: The construction of these graphs required subtraction of the values of the abscissa east (438000) and ordinate north (6646000) to further visualize the data.

The comparison between the measured coordinates with the total station and TLS is given in Figure 3.9 (A, B, C and D). The coefficients for the coordinates East (A), North (B) and Height (C) are around 100% indicating a good fit between the data obtained with TLS and the average linear error (D) is 3,7 cm with a standard deviation of 2,5 cm.

Figure 3.10 and Figure 3.11 show the image-based modeling and terrestrial laser scanner point cloud together. The Chi-Square test indicated 95% level of reliability for georeferencing. The differences were not significant between the control data and the techniques evaluated.

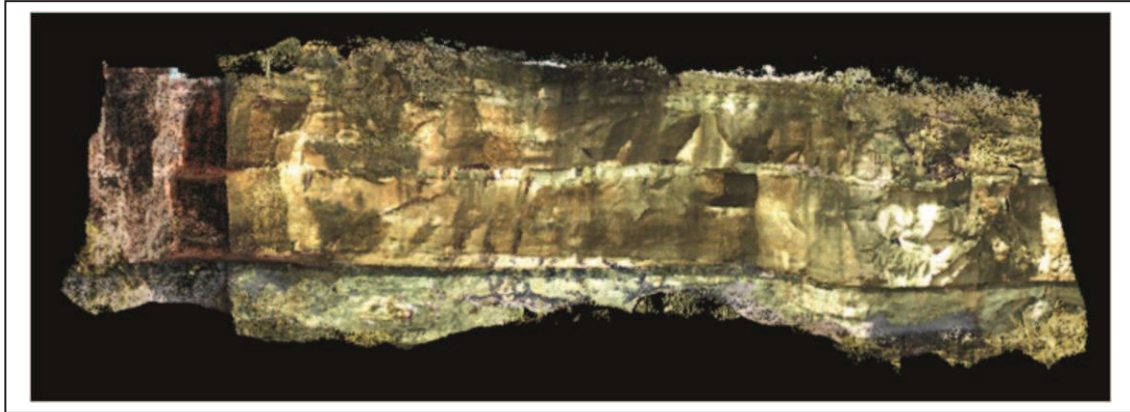


Figure 3.10 – Overlapping image-based modeling and terrestrial laser scanner point cloud.

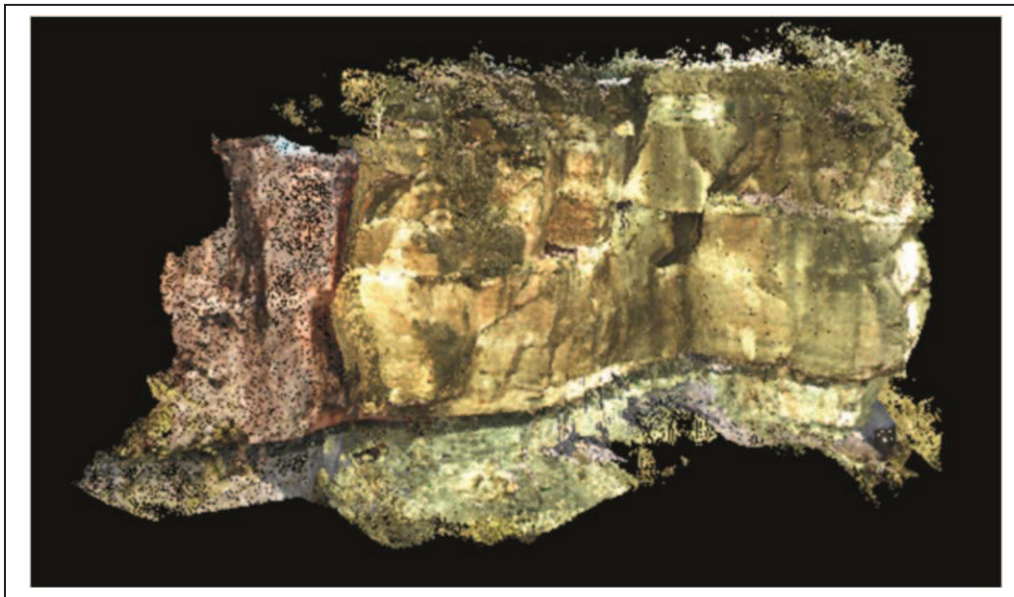


Figure 3.11 - Overlapping image-based modeling and terrestrial laser scanner point cloud: another perspective.

The result of overlap from the East, North and Height of georeferenced points of the image-based modeling and terrestrial laser scanner point cloud are given in Figure 3.11. This overlapping shows that the cloud points of the two methods may be used for the interpretation of outcrop layers.

To analyze the results of overlap, we used the measured points in the survey performed with the total station (Table 3.2), and the bracing coordinates were determined using the georeferenced points (P1E P2) with GNSS-RTK.

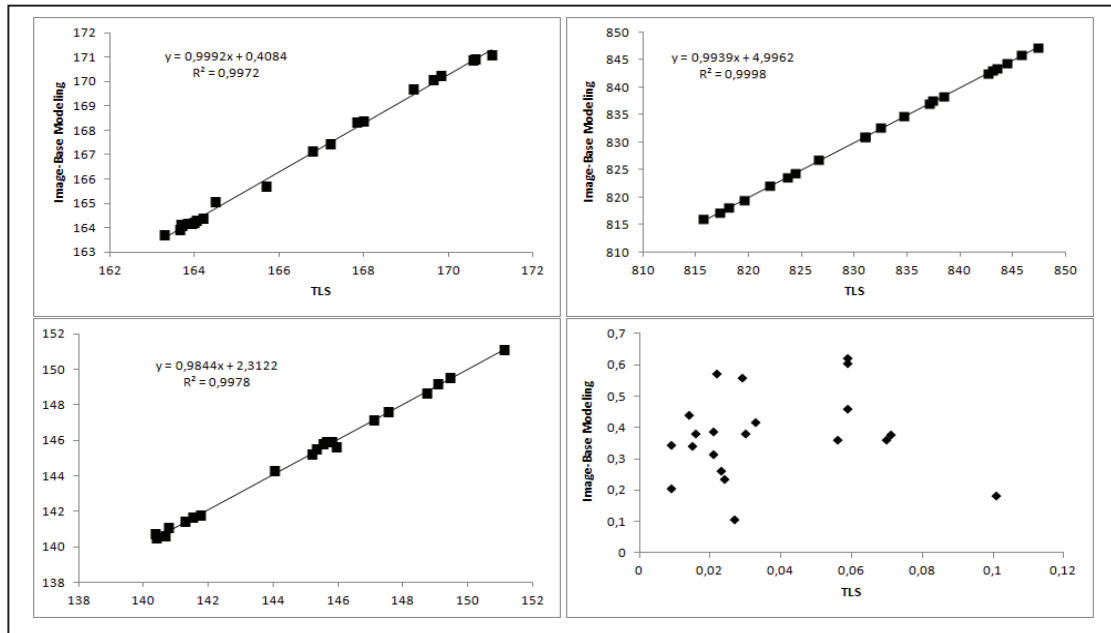


Figure 3.12 – Correlation between terrestrial laser scanner and image-based modeling (photo) to East (A), North (B), Height (C) and Linear Error (D).

Note: The construction of these graphs required subtraction of the values of the abscissa east (438000) and ordinate north (6646000) to further visualize the data.

As indicated in Figure 3.12 the linear error (D) between the points was below 12 cm in the point cloud from LIDAR technique (terrestrial laser scanner), whereas the average linear error observed in the image-based modeling was below 40 cm.

In the comparison of the relative error models of the techniques used (Figure 3. and Figure 3.14) it was observed that the difference became smaller than 5 cm as shown in Table 3.5.

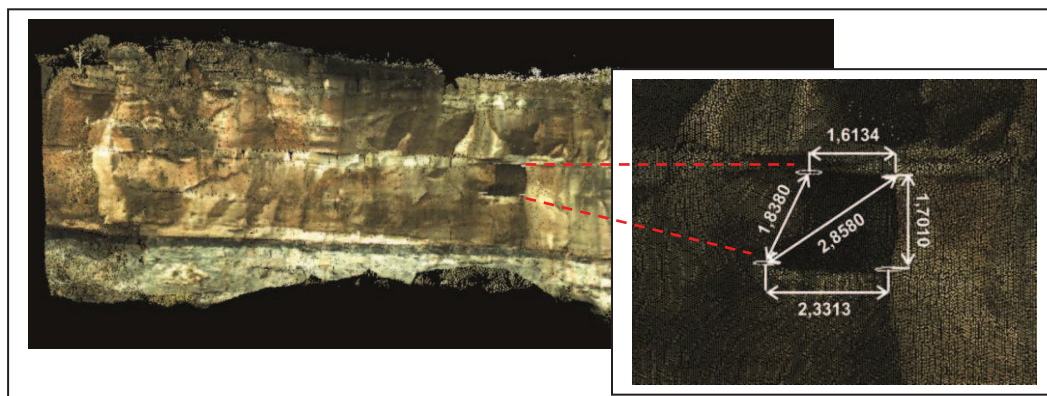


Figure 3.13 - Linear measurements (meters) from a point cloud detail - Terrestrial laser scanner.

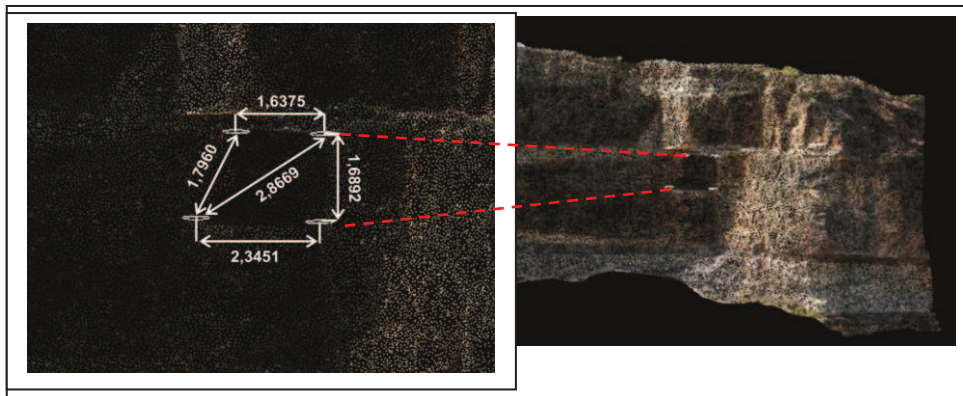


Figure 3.14 – Linear measurements (meters) from a point cloud detail – Image-based modeling.

Table 3.5 - Difference between linear measurements obtained from the models generated

Lines	Terrestrial Laser Scanner (meters)	Image-Based Modeling (meters)	Difference (meters)
1	1,6134	1,6375	-0,0241
2	2,3313	2,3451	-0,0138
3	1,8380	1,7960	0,0420
4	1,7010	1,6892	0,0118
5	2,8580	2,8669	-0,0089

3.5 CONCLUSION

The results obtained show that the use of image-based modeling technique can be used in the area of geology for georeferencing as average linear error is below 40 cm. Thus, it can be used in the interpretation of geological features. Therefore, the point cloud generated from the image-based modeling can provide a product able to assist in the interpretation of geological information in outcrops. This technique can assist in obtaining information about the objects located in places of difficult access due to large size of the outcrop or security reasons.

The relative precision measurements performed from the point cloud obtained from image-based modeling had an error below 5 cm (Table 3.5) than that for the point cloud obtained from terrestrial laser scanner, which allows analysis of geological features for data modeling.

The cost of LIDAR equipment is much higher than a digital camera, hence the image-based modeling can provide good quality results at a lower cost.

It can be concluded from this study that the image-based modeling technique can assist in getting the point cloud in places with occlusions by shading or obstructions around the object of the study, which is not possible using LIDAR technique.

The georeferencing of the point clouds from the image-based modeling technique allowed overlapping of point cloud from the LIDAR technique; it proves that the model generated from photos can be associated to a reference system. This, in turn, allows integration of other information obtained from other data sources.

3.6 REFERENCES

- Alfarhan, M.; white, L.; Tuck, D.; Aiken, C. Laser rangefinders and ArcGIS combined with three-dimensional photorealistic modeling for mapping outcrops in the Slick Hills, Oklahoma, *Geosphere*, June 1, 2008; 4(3): 576 - 587.
- Aliaga, D. G.; Zhang, J.; Boutin, M. Simplifying the Reconstruction of 3D Models using Parameter Elimination. *Computer Vision, 2007. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference on*, 2007. 14-21 Oct. 2007. p.1-8.
- Aguilera, D. G.; González, P. R.; Lahoz, J. G.. Automatic co-registration of terrestrial laser scanner and digital camera for the generation of hybrids models. *ISPRS Workshop on Laser Scanning*, September 12-14, 2007, p. 162 - 168.
- Arnot, M. J.; Lewis, J. M.; Good, T. R. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale out-crop data. 1997. *Journal of sedimentary Reserch*, 67, 984-987.
- Baltsavias, E. P.; Favey, E.; Bauder, A.; Bosh, H. And Pateraki, M.. Digital surface modelling by airborne *laser* scanning and digital photogrammetry for glacial monitoring. *Photogrammetric Record*, n. 17, p. 243-273, 2001.
- Barchik, E.; Moser, I.; Santos, D. S. dos; Martins, B. D. 2007. Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS – 3D no Ramo da Mineração. *Anais. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3631-363.
- Bates, K. T.; Rarity, F.; Manning, P. L.; Hodgetts, D.; Vila, B.; Oms, O.; Galobart, A.; Gawthorpe, R. L. High-resolution LiDAR and photogrammetric survey of the Fumanya dinosaur tracksites (Catalonia): implications for the conservation and interpretation of geological heritage sites, *Journal of the Geological Society*, January 1, 2008; 165(1): 115 - 127.
- Bellian, J. A.; Beck, R.; Kerans, C. Analysis of hyperspectral and lidar data: Remote optical mineralogy and fracture identification, *Geosphere*, December 1, 2007; 3(6): 491 - 500.
- Bellian, J. A., Jennette, D. C., Kerans, C., Gibeaut, J., Andrews, J., Yssldyk, B., Larue, D., 2002, 3-Dimensional digital outcrop data collection and analysus using eye-safe laser (LIDAR) technology: American Association of Petroleum Geologists (AAPG). Search and Discovery Article 40056, (<http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>).
- Bellian, J. A.; Kerans, C.; Jennette, D. C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research*, n. 75, p.166–176. 2005.
- Brahmbhatt S. Practical OpenCV. Apress. November 13, 2013
- Buckley, S. J.; Howell, J. A.; Enge, H.D; Kurz, T. H. Terrestrial *Laser* Scanning in Geology: Data Acquisition Processing and Accuracy Considerations. *Journal of the Geological Society*, London; 2008, v. 165; ISSUE: 3, p. 625-638. DOI: 10.1144/0016-76492007-100.
- Camargo, M. A. R. Geração de objetos virtuais a partir de imagens. 2008. 79p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Faculdade de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, SP, Brasil.

- Centeno, J. A. S.; Wutke, J. D.; Mitishita, E. A.; Vögtle, T. Two Methods to Estimate the Spot Size of Terrestrial Laser Scanners. *Journal of Surveying Engineering*, v. 136, p. 126-131, 2010.
- Enge, H. D.; Buckley, S. J.; Rotevatn, A.; Howell, J. A. From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures, *Geosphere*, December 1, 2007; 3(6): 469 - 490.
- Enge, H. D. & Howell, J. A. Impact of deltaic clinothems on reservoir performance: Dynamic studies of reservoir analogs from the Ferron Sandstone Member and Panther Tongue, Utah. *AAPG Bulletin*, February 1, 2010; 94(2): 139 - 161.
- Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D.; Redfern, J. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco, *AAPG Bulletin*, June 1, 2009; 93(6): 795 - 827.
- Fabuel-Perez, I.; Hodgetts, D.; Redfern, J. Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology - workflow and implications for geological modelling: Oukaimeden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco). *Petroleum Geoscience*, May 1, 2010; 16(2): 133 - 154.
- Ferrari, F., Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Inocêncio, L. C., Paim, P. S. G., Silva, R. M. da. 2012. Visualização e Interpretação de Modelos Digitais de Afloramentos Utilizando Laser Scanner Terrestre. *Geociências (São Paulo. Online)*, v. 31, p. 79-91.
- Freire, R. C. Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR. 2006. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 54p.
- Hartley R. & Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2 edition, April 2004.
- Inocencio, L. C. ; Veronez, M. R. ;Tognoli, F. M. W.; Souza, M. K. ; Silva, R. M. ; Gonzaga JR, L.; Silveira, C. L. B. . *Spectral Pattern Classification in Lidar Data for Rock Identification in Outcrops*. *The Scientific World Journal*, v. 2014, p. 1-10, 2014.
- Jacobi, L.; Macedonio, R. das.; Markoski, P. R.; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Paim, P. S. G.; Faccini, U. F.; Lavina, E. L. C. Modelo Digital de Afloramento visando a análise e interpretação geológica: um estudo de caso baseado em dados de *Laser Scanner 3D Terrestre*, *Anais do 45º Congresso Brasileiro de Geologia PAP916.pdf*, Belém, Pará, Brasil, 2010.
- Janson, X.; Kerans, C.; Bellian, J. A.; Fitchen, W. Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas *AAPG Bulletin*, October 1, 2007; 91(10): 1405 - 1436.
- Jones, R. R.; Kokkalas, S.; Mccaffrey, K. J. W. Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR)--The Arkitsa fault, central Greece, as a case study, *Geosphere*, December 1, 2009; 5(6): 465 - 482.
- Jones, R. R.; Mccaffrey, K. J. W.; Imber, J.; Wightman, R.; Smith, S. A. F.; Holdsworth, R. E.; Clegg, P.; Paola, N. de; Healy, D.; Wilson, R. W. Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues, *Geological Society, London, Special Publications*, January 1, 2008; 309(1): 87 - 98.
- Kurtzman, D.; El Azzi, J. A.; Lucia, F. J.; Bellian, J.; Zahm, C.; Janson, X. Improving fractured carbonate-reservoir characterization with remote sensing of beds, fractures, and vugs, *Geosphere*, April 1, 2009; 5(2): 126 - 139.

- Leung, C. W. Y., Efficient methods for 3d reconstruction from multiple images 3D, 2006, 263p., Ph.D, Thesis, Scholl of Information Technology and Electrical Engineering, Depto of Engineering, University of Queensland, February 2006.
- Maerten, L.; Pollard, D. D.; Maerten, F. 2001. Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, central Utah. *Journal of Structural Geology*, 585-592.
- Mccaffrey, K. J. W.; Hodgetts, D.; Howell, J.; Hunt, D.; Imber, J.; Jones, R.R.; Tomasso, M.; Thurmond, J.; Viseur, S. Virtual fieldtrips for petroleum geoscientists, Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series, January 1, 2010; 7(0): 19 - 26.
- Mccaffrey, K. J. W.; Feely, M.; Hennessy, R.; Thompson, J. Visualization of folding in marble outcrops, Connemara, western Ireland: An application of virtual outcrop technology, *Geosphere*, June 1, 2008; 4(3): 588 - 599.
- Nelson, C. E.; Jerram, D. A.; Hobbs, R. W.; Terrington, R.; Kessler, H. Reconstructing flood basalt lava flows in three dimensions using terrestrial laser scanning, *Geosphere*, February 1, 2011; 7(1): 87 - 96.
- Olariu, M. I.; Ferguson, J. F.; Aiken, C. L. V.; Xu, X. Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas, *Geosphere*, February 1, 2008; 4(1): 247 - 259.
- Phelps, R. M. & Kerans, C. Architectural Characterization and Three-Dimensional Modeling of a Carbonate Channel Levee Complex: Permian San Andres Formation, Last Chance Canyon, New Mexico, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, November 1, 2007; 77(11): 939 - 964.
- Prince S. J. D. *Computer Vision: Models, Learning, and Inference*. Cambridge University Press; 1 edition June, 2012.
- Pringle, J. K.; Westerman, A. R.; Clark, J. D.; Drinkwater, N. J.; Gardiner, A. R. 3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK. *Petroleum Geoscience*, 10, 343-352. 2004.
- Ros, G. A. *Visualização 3D de uma imagem digital*. 2001. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, Brasil.
- Rotevatn, A.; Buckley, S. J.; Howell, J. A.; Fossen, H. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study, *AAPG Bulletin*, March 1, 2009; 93(3): 407 - 427.
- Se, S. & Jasiobedzki P. Photo-realistic 3D Model Recontruction, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, USA., May 1, 2006; 3076 - 3082.
- Silva, R. M. da; Veronez, M. R.; Tognoli, F. M. W.; Souza, M. K.; Inocencio, L. C. Accuracy Analysis of digital outcrop models obtained from terrestrial laser scanner. *Internacional Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*. V. 3, p. 506-515, 2014.
- Souza, A. M. 2013. *Proposta metodológica para o imageamento, caracterização, parametrização e geração de modelos virtuais de afloramentos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 151p.
- Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications (Texts in Computer Science)*. Springer, 2011 edition, October 2010.

- Teixeira, W. L. E. 2008. Aquisição e construção de modelos estáticos análogos a reservatórios petrolíferos com tecnologia LIDAR e GEORADAR. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 99p.
- Thurmond, J. B.; Drzewiecki, P. A.; Xu, X. Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML). *Computers and Geosciences*, 31, 913–919. 2005.
- Verwer, K.; Merino-Tome, O.; Kenter, J. A. M.; Della Porta, G. Evolution of a High-Relief Carbonate Platform Slope Using 3D Digital Outcrop Models: Lower Jurassic Djebel Bou Dahar, High Atlas, Morocco, *Journal of Sedimentary Research*, June 1, 2009; 79(6): 416 - 439.
- Wawrzyniec, T. F.; Mcfadden, L. D.; Ellwein, A.; Meyer, G.; Scuderi, L.; Mcauliffe, J.; Fawcett, P. Chronotopographic analysis directly from point-cloud data: A method for detecting small, seasonal hillslope change, Black Mesa Escarpment, NE Arizona, *Geosphere*, December 1, 2007; 3(6): 550 - 567.
- White, P. D. & Jones, R. R. A cost-efficient solution to true color terrestrial laser scanning, *Geosphere*, June 1, 2008; 4(3): 564 - 575.
- Wutke, J. D.; Centeno, J. S. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 13, p. 151-164, 2007.
- Xu, X.; Bhattacharya, J. B.; Davies, R. K.; Aitken, C. L. V. 2001. Digital Geologic Mapping of the Ferron Sandstone, Muddy Creek, Utah, With GPS an Reflectorless Laser Rangefinders, *GPS Solutions* 5,15-23.
- Zahm, C. K. & Hennings, P. H. Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming, *AAPG Bulletin*, November 1, 2009; 93(11): 1427 - 1446.

CAPÍTULO 4: MODELAGEM DIGITAL DE DADOS GEOLÓGICOS DO AFLORAMENTO MORRO PAPALÉO, COM BASE NA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE (SUB) SUPERFÍCIE

Resumo: A modelagem digital de dados geológicos é um importante recurso, que pode contribuir na interpretação de elementos arquiteturais em diversos tipos de sistemas deposicionais. Com o uso de novas tecnologias como *Laser Scanner* Terrestre e *GPR* tem-se como desafio integrar dados externos e internos de um afloramento, para se trabalhar num modelo tridimensional, georreferenciado por *GNSS*. Para essa análise utilizou-se como área de estudo o Afloramento Morro Papaléo, com características de processos deposicionais fluviais, localizado no município de Mariana Pimentel. Nesse trabalho foi possível integrar diversas fontes de dados, obtidos com ferramentas diferentes, o que permitiu gerar superfícies geológicas, com base na interpretação da nuvem de pontos e nas seções geofísicas. Foi possível também, a integração de elementos obtidos com o uso de Estação Total, baseado em pontos georreferenciados com *GNSS*. Durante a integração dos dados foi possível avaliar a exatidão posicional da topografia do terreno nos dados de subsuperfície, obtidos com *GPR*.

4.1 INTRODUÇÃO

Existem diversas técnicas para analisar afloramentos, porém, com as novas tecnologias de sensoriamento remoto, ganhou-se um grande avanço na área da Geologia com a utilização de *Laser Scanner* Terrestre (*LST*) e a possível integração com dados geofísicos, entre outros.

Pode-se observar o avanço que o *LST* tem, quando comparado com os métodos tradicionais, que tem sido utilizado pelos geólogos em trabalhos de campo, como o uso de bússola, fotografias digitais para montagem de fotomosaico e medidas de espessuras de camadas com o uso de trena. O *LST* também é uma evolução quando comparado com o uso de outras tecnologias, como a medição com estação total e *GNSS* (*Global Navigation Satellite System*), utilizados para obtenção de medidas e posicionamento de pontos georreferenciados. Outra informação que pode ser explorada pelo *LST*, e que os equipamentos citados não possuem, é a obtenção da intensidade do sinal emitido pelo equipamento, podendo-se utilizar esse dado em outras análises como classificação de rochas em afloramentos (Kurz *et al.*, 2008).

No Brasil, a aplicação de *Laser Scanner* na Modelagem Digital de Afloramentos (MDA) está em fase de desenvolvimento, e existem muitas análises a serem estudadas e comparadas com os métodos tradicionais para verificar o ganho de tempo e a qualidade na obtenção dos dados que essa ferramenta pode propiciar.

Modelos digitais tridimensionais possuem aplicações diversas e sua utilização vem crescendo no cenário mundial, em especial aqueles obtidos a partir de *Laser Scanner* Terrestre (Abmayr *et al.*, 2004; Bellian, *et al.*, 2005; Buckley *et al.*, 2006). No Brasil, ainda são poucos os estudos que discutem as vantagens, os métodos de trabalho e as aplicações desta ferramenta (Freire, 2006; Barchik *et al.*, 2007; Wutke & Centeno, 2007; Teixeira, 2008; Centeno *et al.*, 2010; Jacobi *et al.*, 2010; Ferrari *et al.*, 2012). Alguns trabalhos exploram também a intensidade do sinal para classificação de rochas (Inocencio *et al.*, 2014) e aplicações em ciências florestais (Bordin *et al.*, 2013).

Uma técnica que evoluiu rapidamente foi o georreferenciamento de informações geológicas por meio de Sistemas Globais de Navegação por Satélite – *GNSS*. Tais sistemas vêm permitindo ganhos tanto em exatidão quanto em tempo, quando da integração de diferentes produtos geológicos em um único sistema de referência, garantindo uma maior integridade nos processos de geração de modelos geológicos tridimensionais (Pringle *et al.*, 2004; Thurmond *et al.*, 2005; White & Jones, 2008).

Em alguns trabalhos, como por exemplo Teixeira (2008), observou-se que o sistema *LST* permite uma análise da superfície do afloramento, que pode ser modelada através de ferramentas, como o uso do software *GOCAD* (*Geological Object Computer Aided Draw*). Porém, este modelo fica restrito à superfície externa do afloramento, visto que o *Laser Scanner* não atinge as partes internas do mesmo, sendo necessário o uso de outras tecnologias como o *GPR* (*Ground Penetration Radar* – Radar de Penetração) para complementação do modelo, pois com esta tecnologia é possível analisar subsuperfícies, que podem ser interpretadas e modeladas em conjunto com os dados do *Laser Scanner Terrestre*.

Segundo Bristow & Jol (2003), o uso de *GPR* em estudos de depósitos de ambientes fluviais, para identificação de deposição em grande escala, como barra em pontal e outros elementos arquiteturais, tem sido muito utilizado para estudos de subsuperfície e que podem ser integrados com dados de superfície.

Para modelagem geológica, a tecnologia mais adequada para capturar dados de um afloramento depende de vários fatores, dentre eles, o objeto de estudo, a natureza do afloramento, incluindo quantidade de exposição e acessibilidade, nível de detalhe e precisão espacial necessária e as restrições que envolvem tempo e custo (Jones *et al.*, 2008).

A modelagem geológica é utilizada como um meio de compreender arquiteturas geológicas e os seus efeitos sobre o comportamento em análogos de rochas-reservatório (Kurz *et al.*, 2008), além de permitir reunir em um mesmo modelo, informações de topologia, geometria, propriedades e atributos de objetos geológicos.

A utilização de afloramentos análogos na caracterização de atributos físicos de corpos sedimentares e na definição de modelos geológicos é um procedimento de caráter preditivo, devendo ser confiável, permitindo acessar e quantificar os atributos arquiteturais e geométricos dos estratos sedimentares (Paim *et al.*, 2003). Assim, estas novas tecnologias podem permitir esta caracterização, pois subsidiam a interpretações de informações geológicas com uma visão tridimensional (3D) e com precisão submétrica na medição dos elementos.

Dentro desse contexto, para o desenvolvimento do trabalho foi necessário uma análise da exatidão posicional da nuvem de pontos, no qual foi executada no capítulo 2. Com essa análise foi possível agregar, a nuvem de pontos, os dados de subsuperfície obtidos com *GPR*, para posterior interpretação dos elementos arquiteturais no modelo tridimensional gerado.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Materiais

A área de estudo é um afloramento da Formação Rio Bonito, Permiano Inferior da Bacia do Paraná, chamado Morro Papaléo localizado no município de Mariana Pimentel (Figura 4.1), entre as coordenadas geodésicas: latitudes $30^{\circ}18'10''\text{S}$ e $30^{\circ}18'40''\text{S}$ e longitudes $51^{\circ}28'20''\text{W}$ e $51^{\circ}38'20''\text{W}$ no *datum* SIRGAS2000. A área mencionada está localizada em uma pedreira abandonada, originalmente utilizada na exploração de caulim. O afloramento tem uma visão tridimensional com uma boa exposição de rochas, como siltitoossilífero, siltito carbonoso, diamictito e arenito.

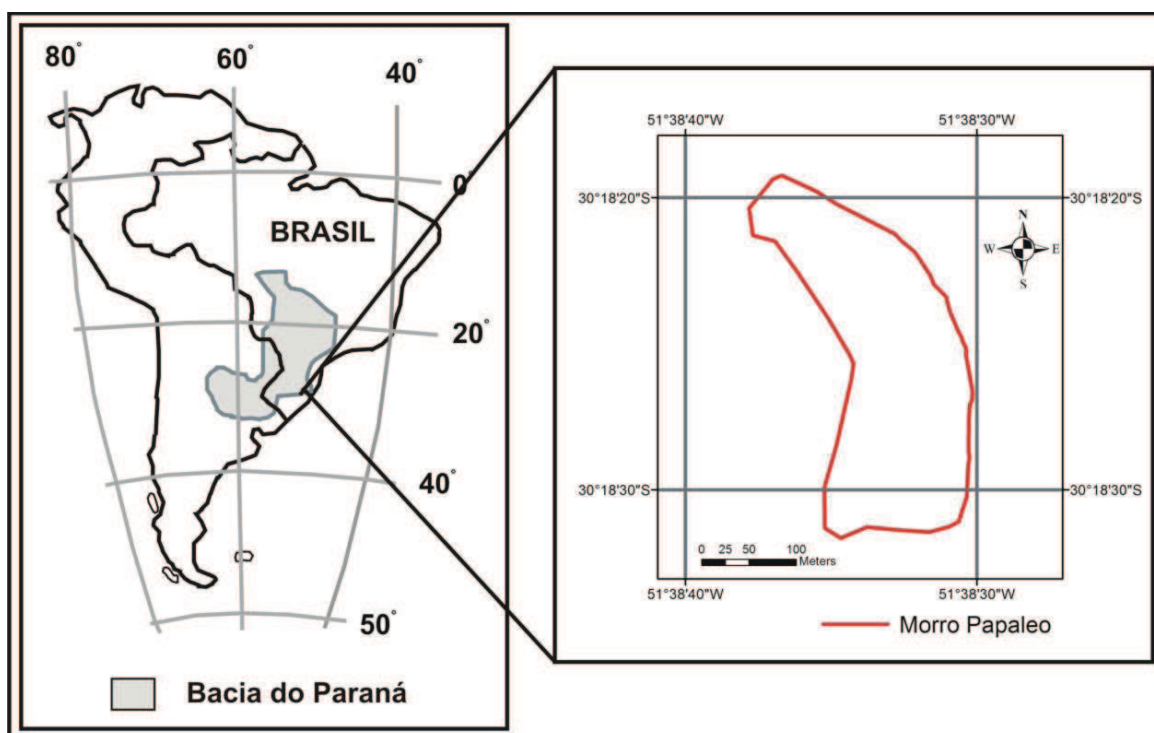


Figura 4.1 - Mapa de localização da área de estudo..

Foram utilizados para a coleta dos dados os seguintes equipamentos disponíveis no Laboratório LASERCA:

- *Laser Scanner Terrestre – Leica Scan Station C10;*
- *GPR (Ground Penetrating Radar) – com antenas de 50 e 100 MHz;*
- *1 par de receptores GNSS/GPS-RTK (Real Time Kinematic) 900;*
- *1 par de receptores GNSS/GPS-RTK – GPS Hiper Lite RTK Plus L1/L2;*
- *Estação Total CTS 3000;*
- *Tripé para Estação Total;*
- *Prisma;*
- *Bastão telescópico;*
- *Poliworks, Point Cloud e Parser – Programas de processamento da nuvem de pontos advindas do Laser Scanner Terrestre;*
- *GOCAD (Geological Object Computer Aided Draw) – Programa para modelagem dos dados processados nos softwares Polyworks (nuvem de pontos) e Reflexw (radargrama);*
- *Leica Geo-Office - Programa de processamento de dados GPS;*

- *Reflexw* – Programa de processamento de dados do *GPR*;
- *Topcon Tools* - Programa de processamento de dados *GPS Topcon Hiper Lite RTK Plus L1/L2*;
- *Posição 2004* – Programa de processamento de dados advindos da Estação Total;
- *Software Cyclone* – Programa de processamento dos dados advindos do *Laser Scanner Terrestre*;
- *Autocad Map 2010* – Programa utilizado para o planejamento das linhas do *GPR* e para os cálculos das curvas de nível e dos perfis do topo do afloramento.

4.2.2 – Métodos – Dados de Superfície

Para a obtenção dos dados de superfície, foram seguidas as etapas definidas no fluxograma 1 apresentado na Figura 4.2.

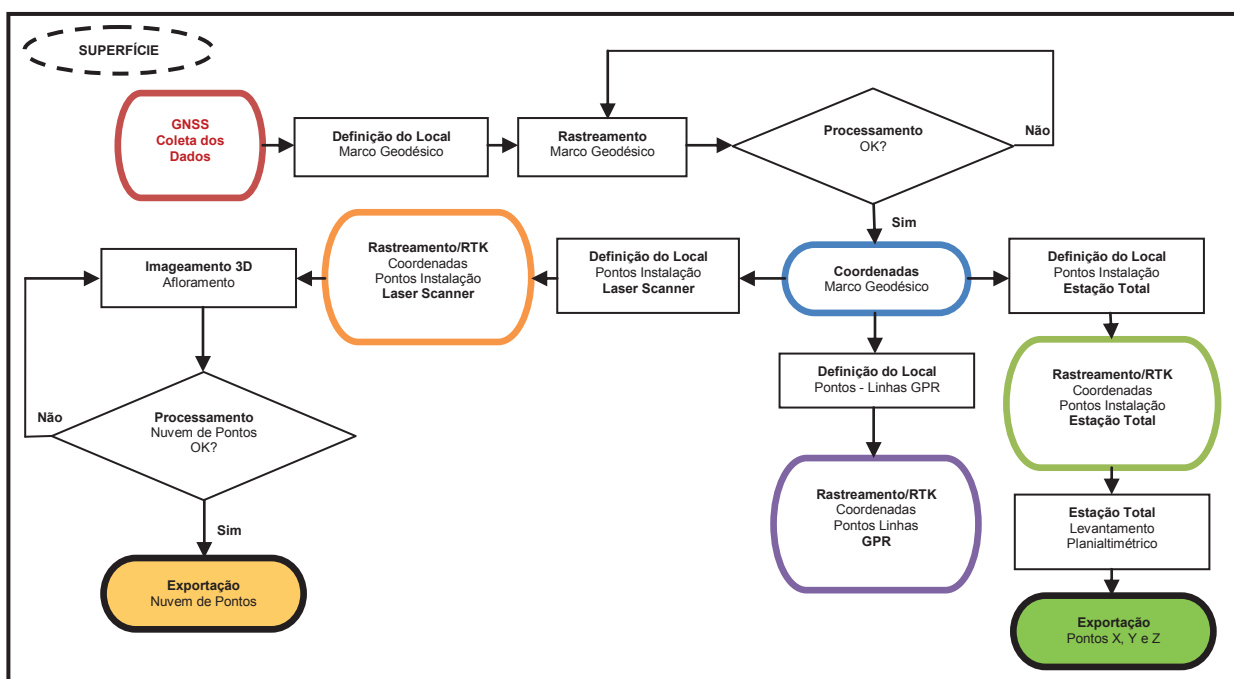


Figura 4.2 – Fluxograma 1 - etapas para obtenção de dados de superfície

Com as coordenadas obtidas nos dados de superfície, estas foram utilizadas em três situações no trabalho de campo:

- ✓ Transporte de coordenadas para os pontos de instalação da estação total;
- ✓ Transporte de coordenadas para os pontos de instalação do *laser scanner*;
- ✓ Transporte de coordenadas para os pontos que definiram as linhas (seções) *GPR*.

4.2.2.1 – Coleta dos Dados GNSS – Rastreamento do Marco Geodésico

Para a coleta dos dados GNSS, de acordo com as informações do fluxograma 1 (Figura 4.2), foi necessário, como primeira etapa do processo, o transporte de coordenadas, para um ponto estratégico do afloramento, sendo implantado um Marco Geodésico (Figura 4.3) que foi rastreado durante 4 horas, com taxa de coleta de 15 segundos, máscara de elevação de 15°, utilizando-se receptores GNSS de dupla frequência (L1/L2). No transporte de coordenadas foram utilizados como pontos de controle, as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) das cidades de Santa Maria (SMAR) e Porto Alegre (POAL), suas coordenadas oficiais são listadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

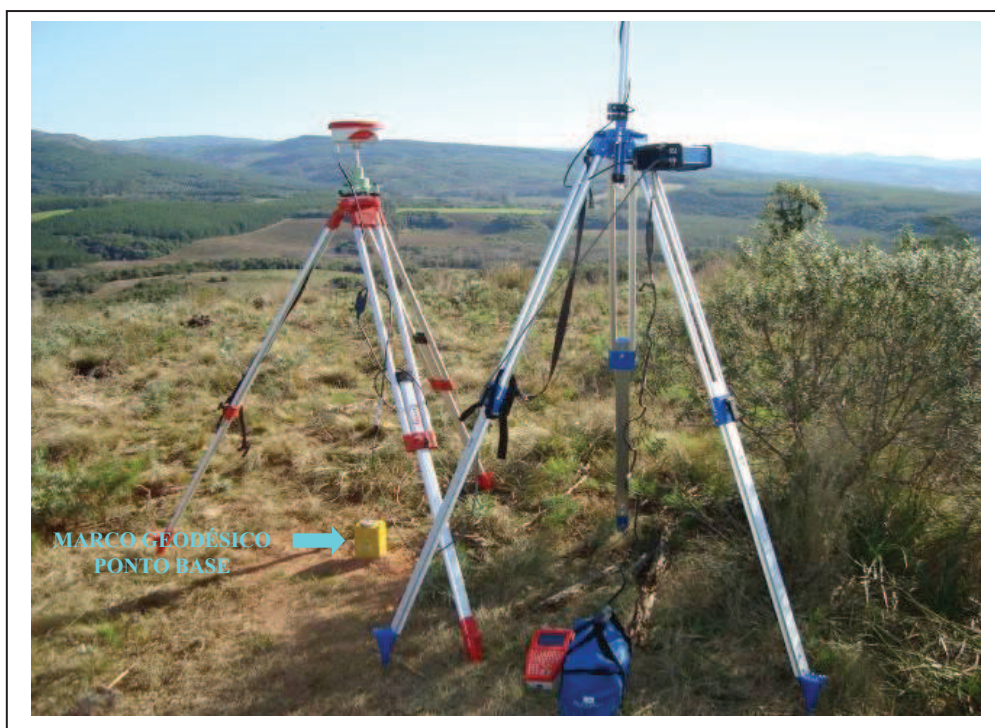


Figura 4.3 - Marco Geodésico (ponto base).

Tabela 4.1- Coordenadas oficiais do vértice SMAR – Referência SIRGAS – 2000

Latitude:	29° 43' 08,1260" S	Sigma	0,001 m
Longitude:	53° 42' 59,7353" W	Sigma	0,001 m
Altitude Elipsoidal:	113,11 m	Sigma	0,001 m
Altitude Ortométrica:	104,53 m	Fonte:	GPS/MAPGEO2004
UTM (N):	6.709.269,527 m		
UTM (E):	237.205,247 m		
MC:	- 51		

Fonte: IBGE 2009

Tabela 4.2 - Coordenadas oficiais do vértice POAL – Referência SIRGAS – 2000

Latitude:	30° 04' 26,5527" S	Sigma	0,001 m
Longitude:	51° 07' 11,1532" W	Sigma	0,002 m
Altitude Elipsoidal:	76,75 m	Sigma	0,002 m
Altitude Ortométrica:	72,58 m	Fonte:	GPS/MAPGEO2004
UTM (N):	6.673.004,056 m		
UTM (E):	488.457,545 m		
MC:	- 51		

Fonte: IBGE (2009)

Como resultado do processamento dos dados do ponto base, utilizando-se o software *Leica Geo-Office*, obteve-se as coordenadas da Tabela 4.3. Mas se durante o processamento houvesse alguma inconsistência nos dados, como coordenadas não gravadas, tempo de rastreamento incompatível com o que foi planejado (4 horas), falta de informação da altura da antena no ato da medição, entre outros, seria necessário executar um novo rastreamento do ponto. Essa situação aparece no fluxograma 1, na opção **Não** do processamento do marco geodésico.

Tabela 4.3 - Coordenadas processadas do ponto base instalado no topo do afloramento. Sistema de referência SIRGAS2000 e Meridiano Central 51° W.

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)	UTM Este (m)	UTM Norte (m)
Base	30° 18'23.17974"S	51° 38'32.71122"W	171,6320	438230,707	6647083,201

4.2.2.2 – Transporte de coordenadas e Imageamento do Afloramento - *Laser Scanner* Terrestre

Para o imageamento do afloramento Morro Papaléo foi necessário a instalação do *GNSS-RTK (Real-Time Kinematic)* no marco geodésico (ponto base - Figura 4.3), no qual executou-se o transporte de coordenadas aos pontos de controle (para uso do *LST* – Figura 4.4B e 4.4C).

Foi necessário implantar 8 (oito) pontos de controle (Figura 4.4A) para o imageamento, sendo 4 (quatro) pontos na parte leste do afloramento e os outros 4 (quatro) pontos na parte oeste (Figura 4.4A).

É importante ressaltar que, no trabalho de campo, deve-se garantir uma sobreposição mínima de 10% entre as cenas imageadas, para que ocorra uma junção adequada, e também, para minimizar os efeitos provocados pela formação de sombras durante o imageamento (Bellian *et al.*, 2005), que ocorrem devido a obstáculos encontrados no campo, como vegetações, orientação e variações do relevo da superfície a ser escaneada.

Durante o trabalho de campo, o *LST* foi instalado em pontos estratégicos, possibilitando que os mesmos fossem intervisíveis para se obter o azimuth do escaneamento, utilizando-se um dos pontos de controle como ponto de ré. Este procedimento teve a duração de aproximadamente 8 horas.

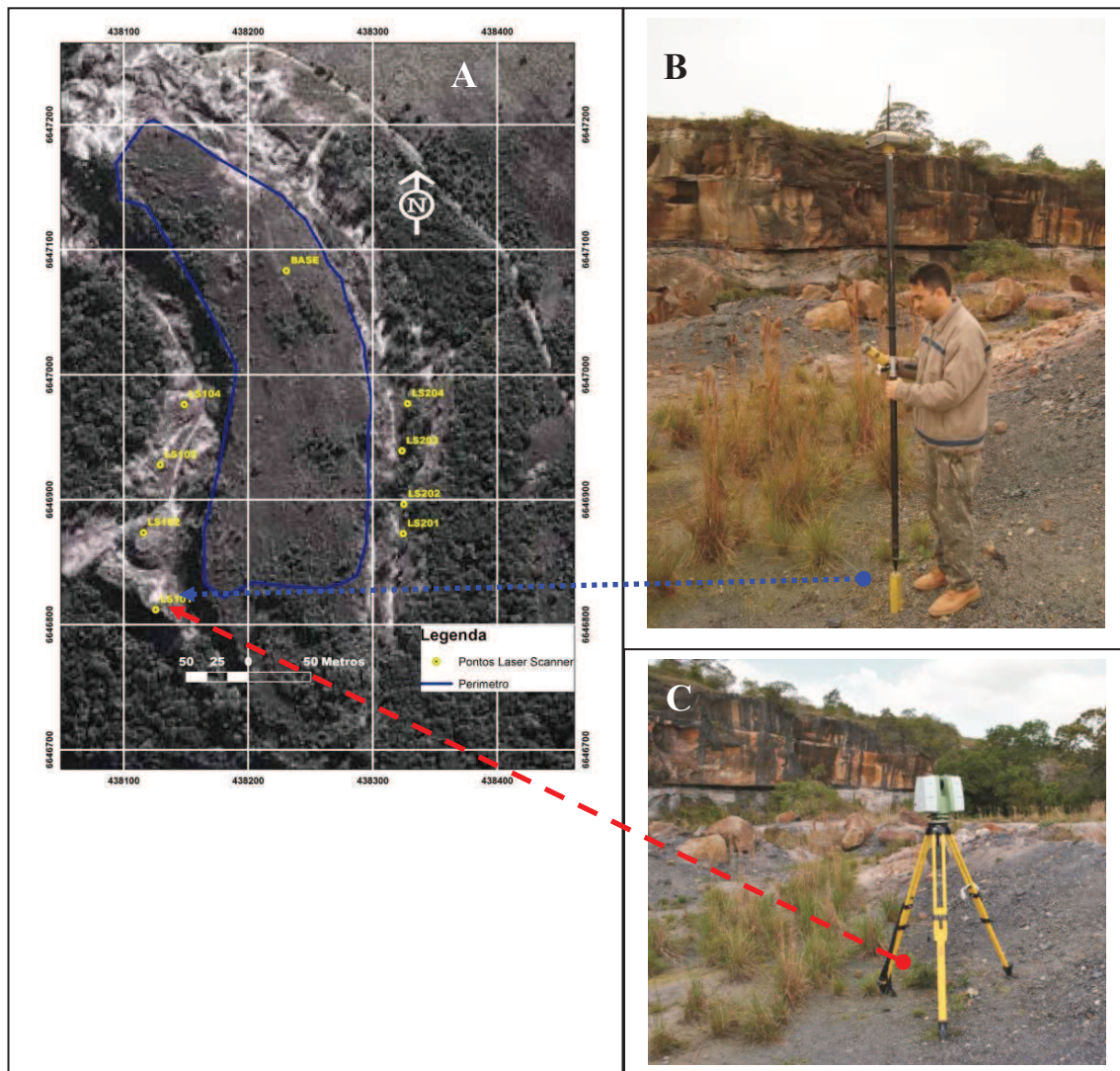


Figura 4.4 (A, B e C) - (4.4A) Pontos de controle dos lados leste e oeste do afloramento – (4.4B) Ponto de controle medido com *GNSS-RTK* – (4.4C) Instalação do laser scanner no ponto de controle (lado oeste)

Como resultado do transporte de coordenadas dos pontos de instalação do *Laser Scanner* Terrestre, obteve-se as coordenadas dos pontos de imageamento, que podem ser observadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Coordenadas dos pontos de imageamento do afloramento obtidas a partir do ponto base, com o *GNSS-RTK*. Sistema de referência SIRGAS2000 e Meridiano Central 51° W.

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal (m)	UTM Este(m)	UTM Norte (m)
Lado Oeste					
LS101	30° 18'31.9667"S	51° 38'36.6960"W	136.7751	438125.8080	6646812.1150
LS102	30° 18'29.9632"S	51° 38'37.0570"W	138.7596	438115.8170	6646873.7310
LS103	30° 18'28.2089"S	51° 38'36.5350"W	140.7841	438129.4550	6646927.8130
LS104	30° 18'26.6396"S	51° 38'35.8069"W	142.0087	438148.6260	6646976.2310
Lado Leste					
LS201	30° 18'30.0301"S	51° 38'29.2420"W	148.9774	438324.5580	6646872.8540
LS202	30° 18'29.2624"S	51° 38'29.2188"W	149.9921	438325.0440	6646896.4880
LS203	30° 18'27.8767"S	51° 38'29.2625"W	153.5244	438323.6350	6646939.1380
LS204	30° 18'26.6506"S	51° 38'29.0916"W	153.4479	438327.9860	6646976.9060

Para o imageamento do afloramento foi utilizado o equipamento *Leica Scanner Station C10* (Figura 4.4C), sendo adotada uma resolução do espaçamento, para a nuvem de pontos, entre 2 mm e 4 cm com um resultado total de 56.612.474 pontos.

Pode-se observar, durante o trabalho de campo, que há necessidade da definição de uma equipe multidisciplinar, onde os componentes necessitam ter as seguintes qualificações e responsabilidades:

- ♦ **Componente 1** – técnico com conhecimentos sobre *GNSS* – responsável pela seleção do local de instalação do marco geodésico (ponto base), operação, manuseio e processamento dos dados;
- ♦ **Componente 2** – técnico com conhecimentos para operação e manuseio do *Laser Scanner Terrestre (LST)*;
- ♦ **Componente 3** – técnico da área de geologia, de fundamental importância para a definição dos pontos para instalação do *LST*. A visão do geólogo vai nortear as interpretações futuras do trabalho, principalmente referente às feições importantes que só podem ser visualizadas se forem imageadas de um local estratégico.

No Afloramento Morro Papaléo, tem-se a predominância de arenito, carvão e diamictito, que pode ser observado na nuvem de pontos da Figura 4.5, obtido com o uso do *laser scanner* terrestre.

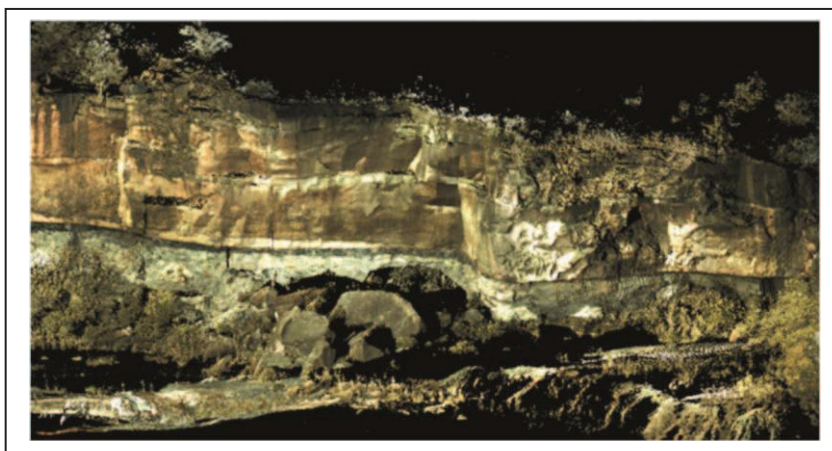


Figura 4.5 - Nuvem de pontos obtida com *Laser Scanner* Terrestre, destacando-se as camadas de arenito

A nuvem de pontos obtidas no imageamento foi exportada no formato X, Y, Z, para modelagem no *software GOCAD*.

4.2.2.3 - Processamento dos Dados do *Laser Scanner* Terrestre

Para o processamento dos dados do *laser scanner* terrestre, seguiu-se os procedimentos da Figura 4.6:

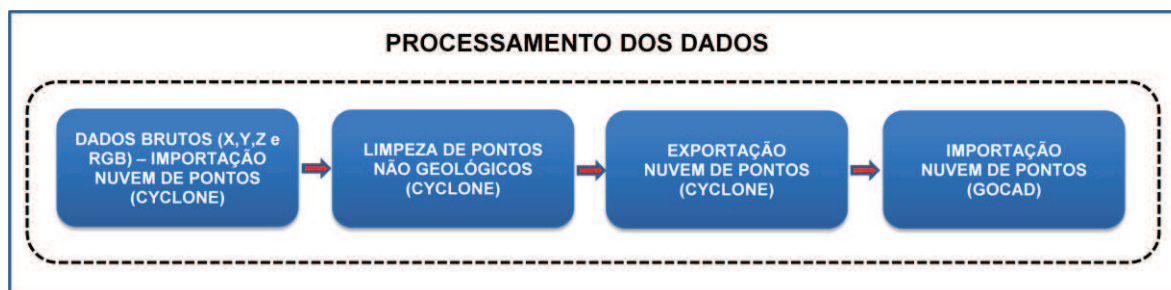


Figura 4.6 - Organograma do processamento dos dados do *Laser Scanner* Terrestre – Adaptado de Nguyen et. al. (2011)

Com base no *software Cyclone*, importou-se os dados brutos (nuvem de pontos com X, Y, Z e RGB - Figura 4.7) obtidos do trabalho de campo (equipamento C10 da *Leica*).

No trabalho de campo utilizou-se pontos de apoio georreferenciados, sendo executado, durante a coleta de dados, o método de poligonal apoiada, obtendo-se assim, a nuvem de pontos importada no *software Cyclone* com as coordenadas georreferenciadas, não sendo, portanto, necessário utilizar outros procedimentos para a junção das partes escaneadas.

Na Figura 4.7, pode-se observar que a nuvem de pontos das duas faces do afloramento (lado leste e lado oeste) ocuparam a posição de forma correta ao serem importadas no *software Cyclone*.

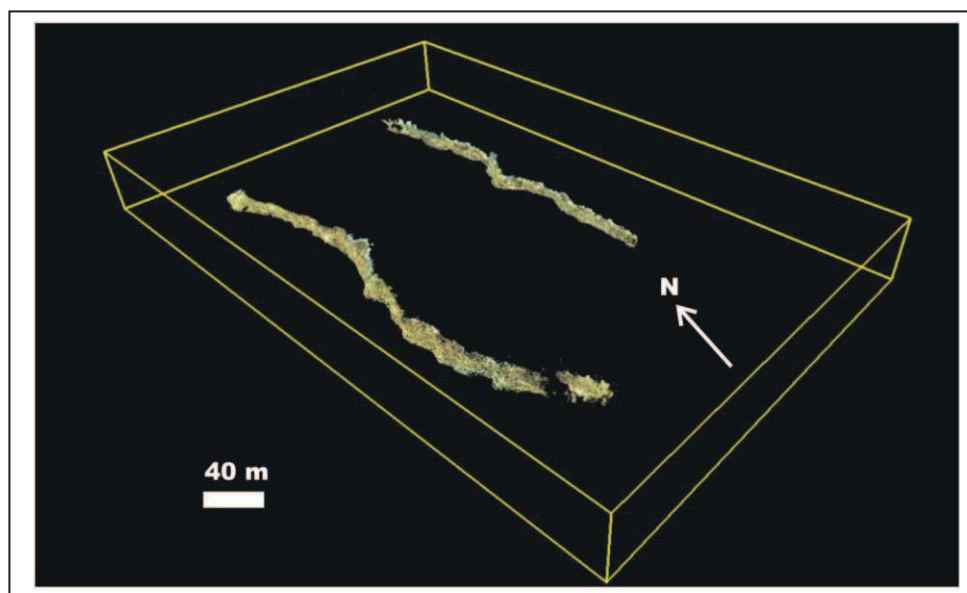


Figura 4.7 - Visualização da nuvem de pontos (X, Y, Z e RGB) importada no *software Cyclone*, com os lados leste e oeste do afloramento

Com os dados importados, foi necessário executar a limpeza de pontos não geológicos, como vegetação e pilhas de materiais soltos no entorno do afloramento, para facilitar a visualização das camadas (Figura 4.8A e 4.8B).

Na Figura 4.8C é possível observar a triangulação da nuvem de pontos, após a importação advinda do *software Cyclone*.

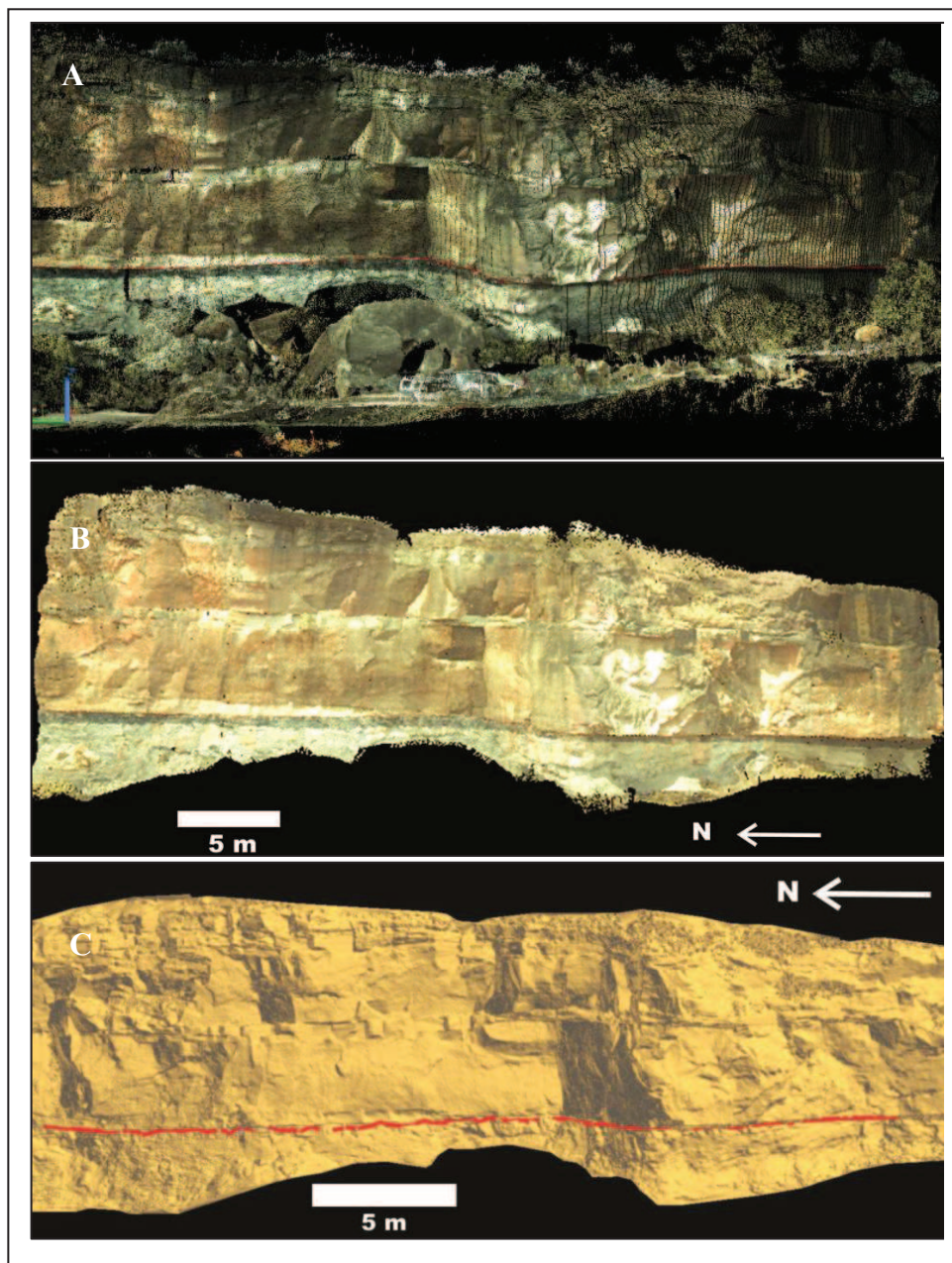


Figura 4.8 (A, B e C) - (4.8A) Nuvem de pontos sem a limpeza de obstruções - (4.8B) Nuvem de pontos com a limpeza das obstruções - (4.8C) Triangulação executada no software *GOCAD*, com uma linha inserida a partir da medição de campo com estação total

4.2.2.4 - Levantamento Topográfico do Topo do Afloramento

Para a modelagem da parte superior do afloramento (topo), foi necessário executar o levantamento topográfico planialtimétrico, utilizando-se para isto uma Estação Total *Topcon* CTS 3000, apoiado em pontos estratégicos que foram medidos com receptor *GNSS-RTK*.

O sistema de referência utilizado para o levantamento topográfico planialtimétrico foi o Datum SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), cujas coordenadas geodésicas foram

convertidas, posteriormente, para coordenadas planas na projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), Meridiano Central 51° W.

As coordenadas tridimensionais dos pontos topográficos transportados (Figura 4.9B e Figura 4.9C) foram georreferenciadas através do transporte de coordenadas do Marco Geodésico (ponto base – Figura 4.9A) implantado no topo do afloramento.

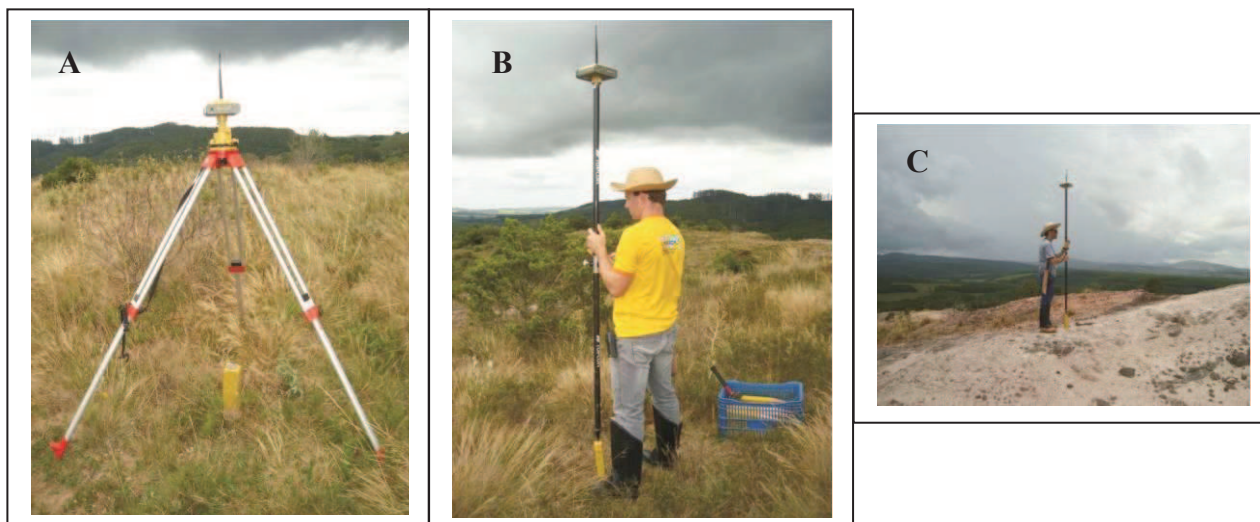


Figura 4.9 (A, B e C) - (4.9A) Marco Geodésico e (4.9B e 4.9C) Pontos Topográficos medidos com GNSS Geodésico de Dupla Frequência com *Link* de Rádio

Durante o levantamento topográfico planialtimétrico, foi necessário implantar novos vértices com *GNSS-RTK*, para que o mesmo permitisse uma maior visibilidade dos pontos a serem medidos, e neste caso, abrangendo toda a área da parte superior do afloramento.

Para abranger toda a área de interesse, foram medidos 593 pontos (Figura 4.10) com a Estação Total, pontos estes, distribuídos em locais estratégicos no topo do afloramento. Estes pontos serviram, posteriormente, para gerar as curvas de nível (Figura 4.11) com espaçamento de metro em metro, utilizando-se para isso, o *software* de processamento dos dados da Estação Total (Posição 2004).

Estas informações foram, posteriormente, exportadas para o formato *DXF* e importadas no *software GOCAD*, para modelagem do topo do afloramento, e também, para gerar as coordenadas tridimensionais que foram inseridas nas seções geofísicas, advindas dos dados do equipamento *GPR*.

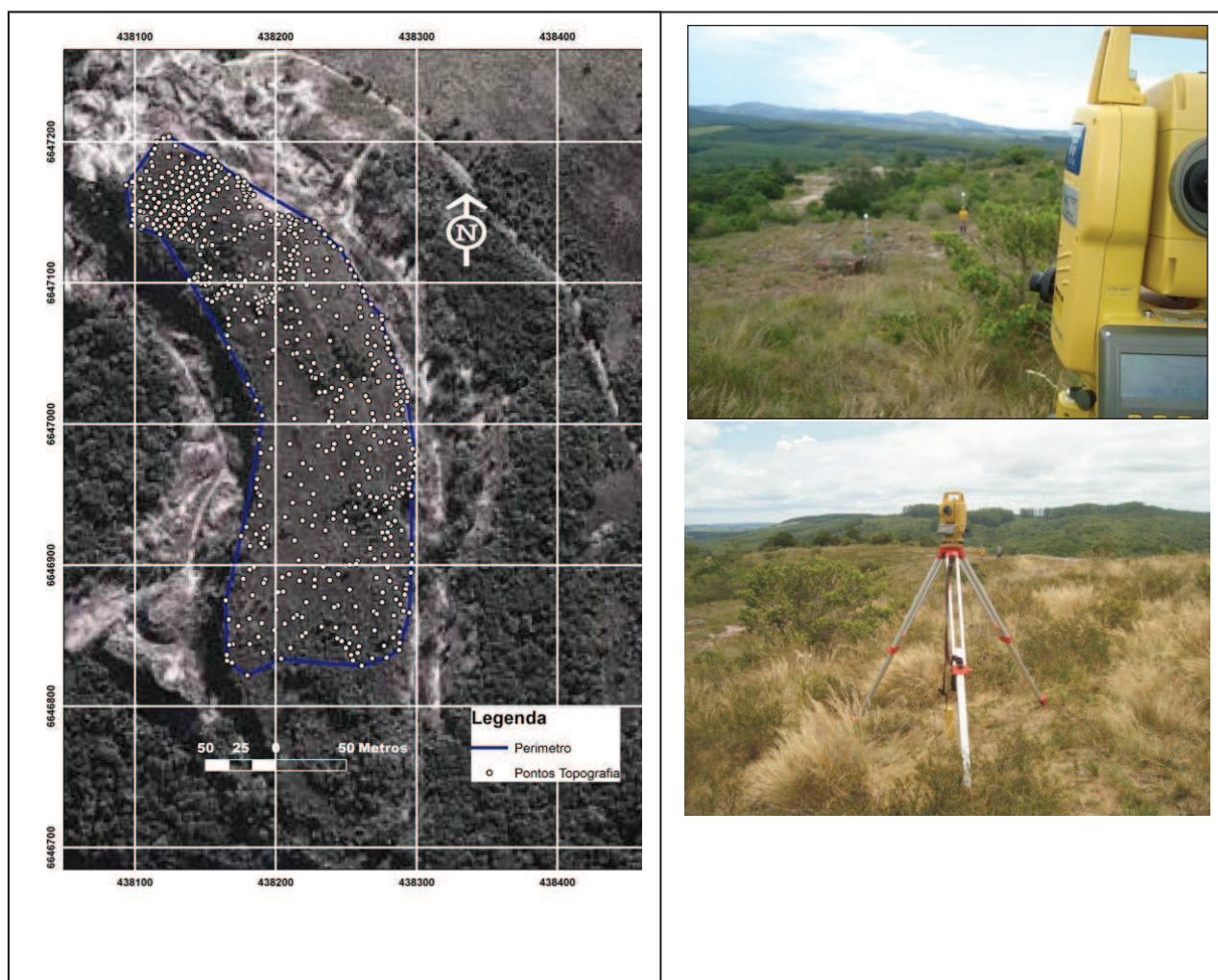


Figura 4.10 - Pontos topográficos medidos com Estação Total

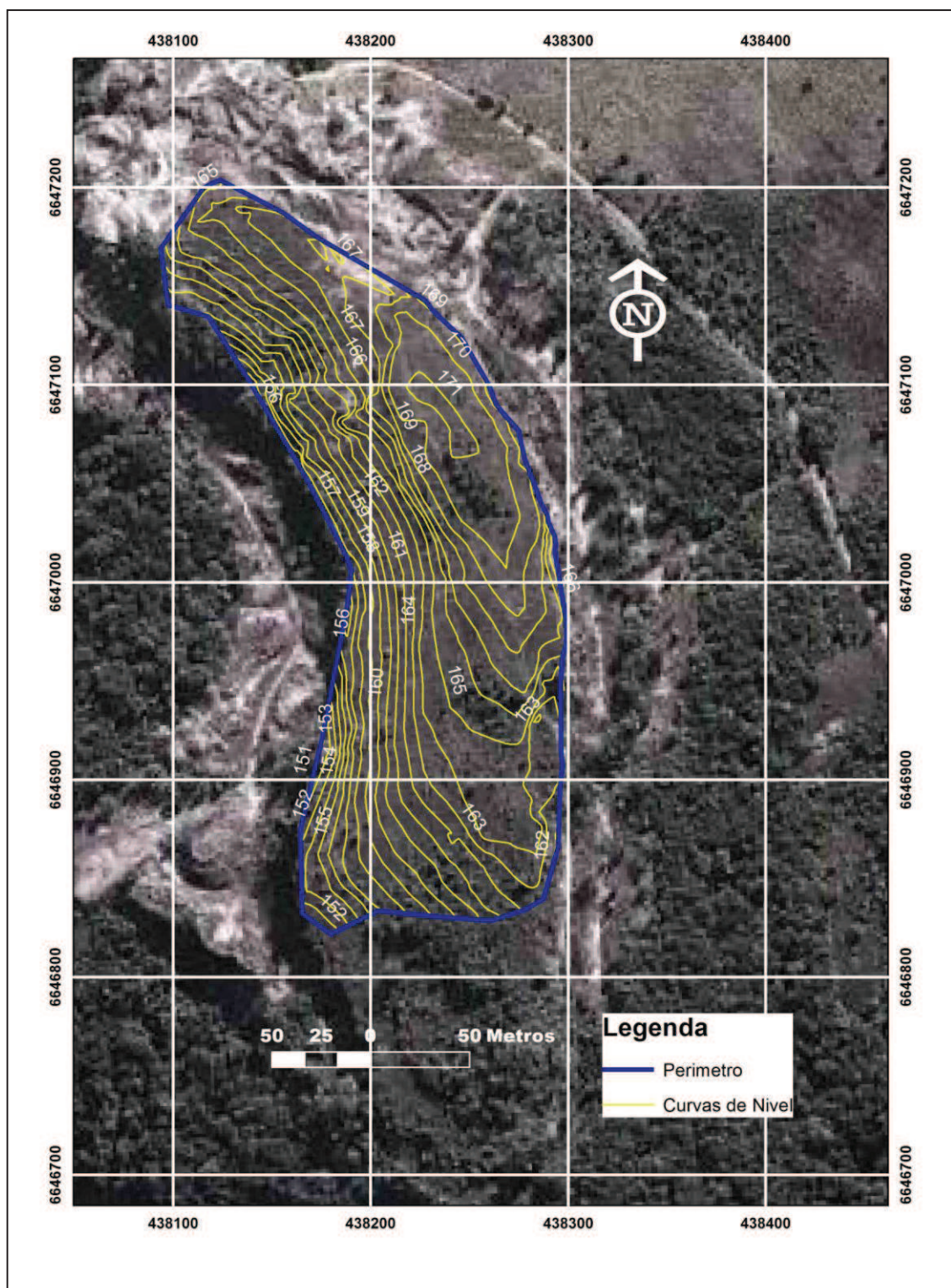


Figura 4.11 - Curvas de nível do topo do afloramento

As curvas de nível foram exportadas no formato *DXF*, para importação no *software GOCAD*, pois elas serviram como parâmetro para análise da altimetria das seções geofísicas.

4.2.2.5 - Implantação das Linhas Geofísicas para Medição com equipamento *GPR* (*Ground Penetration Radar*)

Para o levantamento das seções geofísicas (subsuperfície) do afloramento foi necessário, primeiramente, definir a orientação das linhas a serem medidas com equipamento *GPR*. Estas linhas foram orientadas tomando-se como parâmetro a orientação de um paleocanal, que foi observado no campo, no entorno do afloramento. O paleocanal observado, cuja direção do talvegue foi medida com uma bússola, teve uma orientação de $55^\circ - 235^\circ$.

Com a informação da direção do talvegue, adotou-se como parâmetro orientação $145^\circ - 325^\circ$ em relação à orientação do paleocanal, para a implantação dos pontos definidores das seções geofísicas no topo do afloramento. Esta orientação foi utilizada de forma a obter seções geofísicas perpendiculares à orientação do paleocanal.

No campo, utilizando-se uma bússola, fez-se a orientação e a marcação de três pontos com piquetes, e os mesmos foram medidos com receptor *GNSS* de dupla frequência, para obtenção das coordenadas deste primeiro alinhamento, que posteriormente, serviu como parâmetro para o planejamento das outras seções.

Para o planejamento das seções geofísicas (*GPR*), utilizou-se o *software Autocad Map 2010*, adotando-se como distância entre elas 30 metros para cada lado, tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal (Figura 4.12 - linhas em vermelho). Devido à situação do terreno foi necessário criar uma nova linha longitudinal (pontos N1, N2, N3 e N4), com uma distância menor de 15 metros em relação à linha longitudinal 25-38.

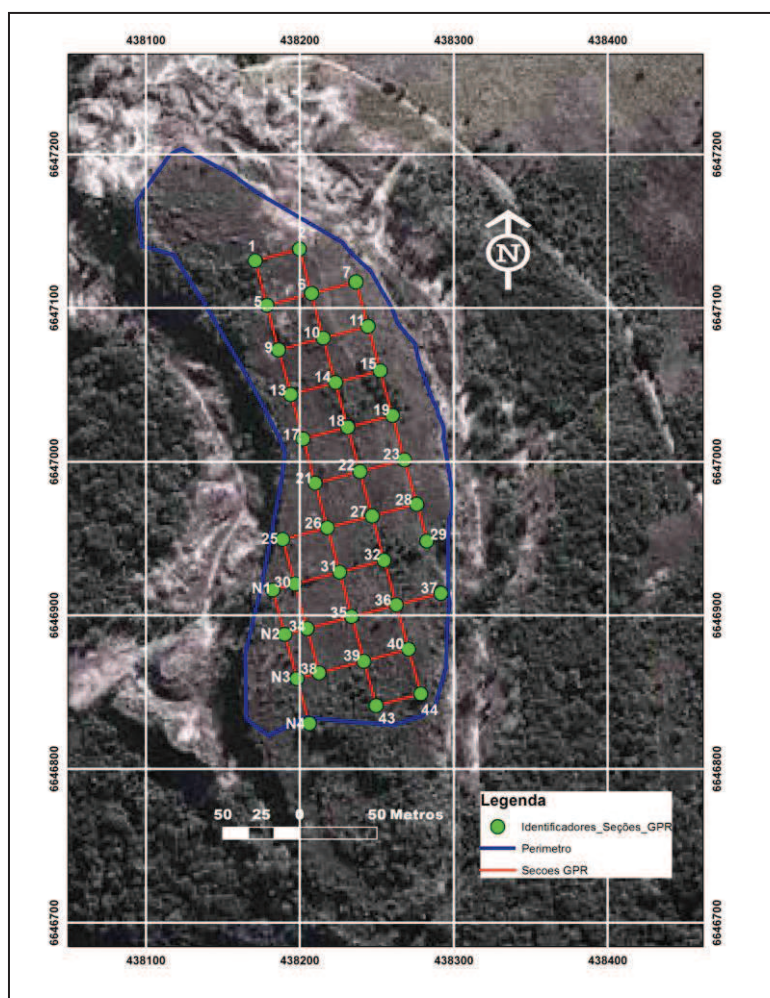


Figura 4.12- Linhas geofísicas para o levantamento das seções (subsuperfície) com equipamento *GPR*

Os 38 pontos (Figura 4.12), foram obtidos a partir do cruzamento das linhas das seções geofísicas (*GPR*), e os mesmos (Tabela 4.5) foram, posteriormente, exportados em formato *DXF* para serem inseridos no equipamento *GNSS/RTK* de dupla frequência e locados no topo do afloramento (Figura 4.13A, 4.13B e 4.13C).

Tabela 4.5- Coordenadas dos pontos para medição das linhas das seções geofísicas

Pontos	Este	Norte	Pontos	Este	Norte
1	438170,815	6647130,774	27	438246,865	6646964,650
2	438199,830	6647138,401	28	438275,881	6646972,278
5	438178,443	6647101,759	29	438282,458	6646948,261
6	438207,457	6647109,387	30	438196,758	6646920,459
7	438236,471	6647117,014	31	438225,774	6646928,086
9	438186,150	6647072,766	32	438254,790	6646935,714
10	438215,166	6647080,394	34	438204,683	6646891,523
11	438244,182	6647088,022	35	438233,699	6646899,150
13	438194,075	6647043,830	36	438262,715	6646906,778
14	438223,091	6647051,458	37	438291,730	6646914,406
15	438252,107	6647059,086	38	438212,608	6646862,587
17	438202,000	6647014,894	39	438241,624	6646870,214
18	438231,016	6647022,522	40	438270,639	6646877,842
19	438260,031	6647030,150	43	438249,548	6646841,278
21	438209,925	6646985,958	44	438278,564	6646848,906
22	438238,940	6646993,586	N1	438182,319	6646916,495
23	438267,956	6647001,214	N2	438190,208	6646887,554
25	438188,834	6646949,395	N3	438198,130	6646858,630
26	438217,849	6646957,022	N4	438206,106	6646829,621

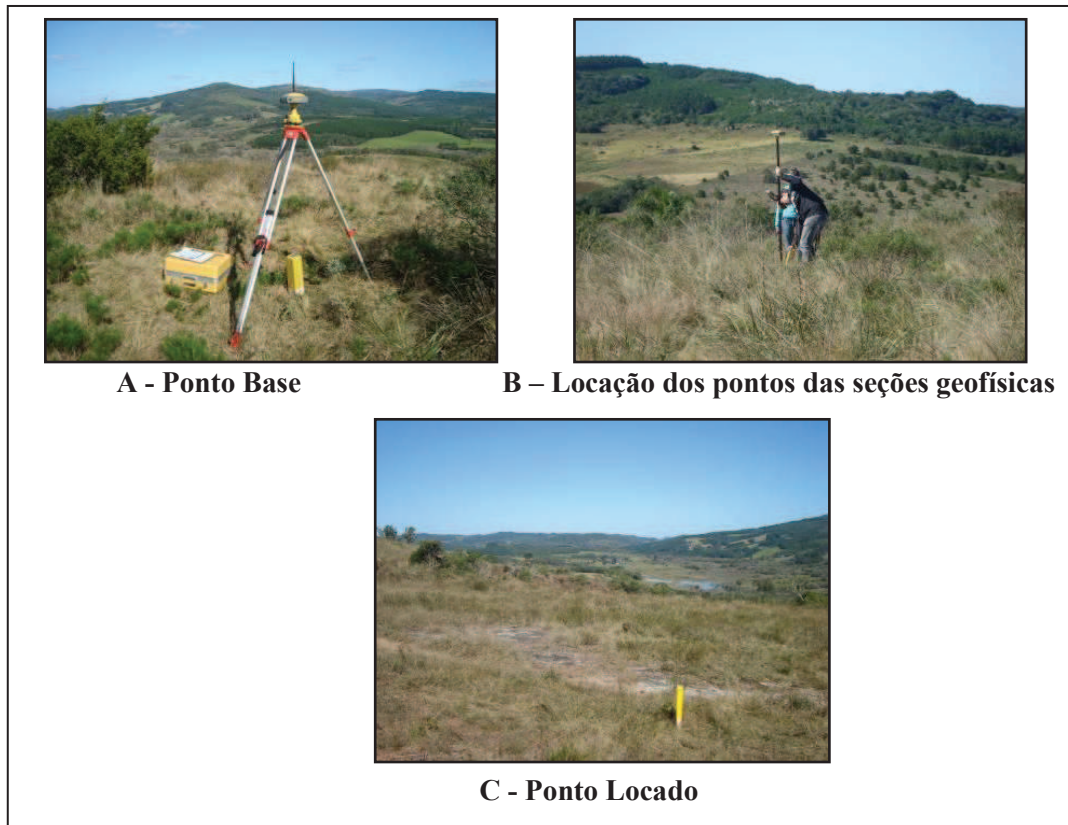


Figura 4.13 (A, B e C) - Locação dos pontos (seções *GPR*) no topo do Afloramento – (4.13A) ponto base – (4.13B) locação – (4.13C) ponto locado

4.2.3 – Métodos – Dados de Subsuperfície

Para o levantamento dos dados de subsuperfície, de acordo com o fluxograma 2 da Figura 4.14, foi necessário executar a aquisição das informações por meio de equipamento *GPR*, com base nas linhas locadas na parte superior do afloramento.

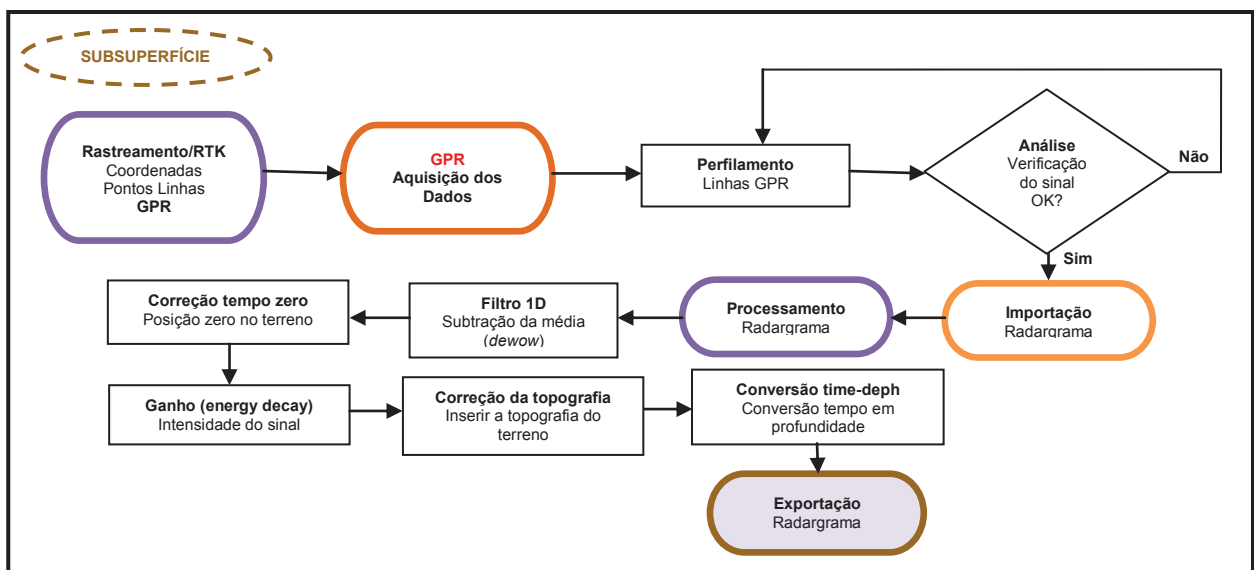


Figura 4.14- Fluxograma 2 - etapas para obtenção de dados de subsuperfície

4.2.3.1 - Levantamento das Seções Geofísicas

Para o levantamento de campo das seções geofísicas com equipamento *GPR*, foi necessário preparar o alinhamento das linhas das seções, utilizando-se para isso um barbante, que foi amarrado aos piquetes (pontos implantados no campo), com o objetivo de facilitar a visibilidade dos alinhamentos, servindo também, como rota para guiar a antena do *GPR*. Durante a aquisição dos dados (perfilamento), observou-se muitos obstáculos, dos quais podem-se citar o próprio relevo do terreno, um pouco acidentado, além de galhos existentes com pequenos e médios arbustos (Figuras 4.15A e 4.15B), que dificultavam o caminhar com os equipamentos.

Foi necessário analisar, durante a aquisição dos dados, a situação do sinal recebido na controladora, pois ao se observar problemas de ruído ou perda de sinal, era necessário refazer novamente a linha.

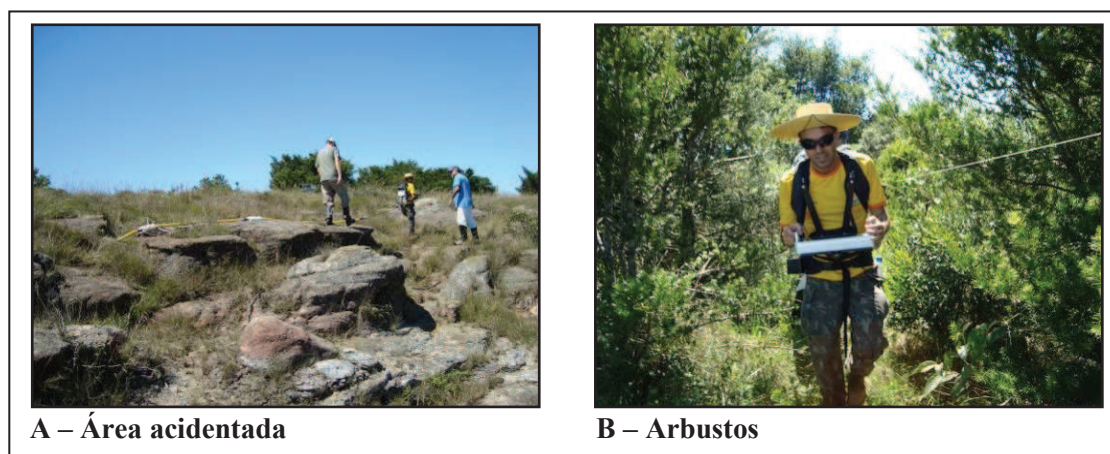


Figura 4.15 (A e B) - Levantamento de campo das seções geofísicas com *GPR* – (4.15A) Área acidentada – (4.15B) Arbustos médios

No trabalho de campo, foram levantadas as seções geofísicas longitudinais (5 - cinco) e transversais (8 - oito), num total de 13 (treze) seções, cujas maiores tinham 300 (trezentos) metros de comprimento, e para isso, utilizou-se uma antena de 100 MHz.

Este trabalho envolveu uma equipe com 5 (cinco) pessoas, com a função de auxiliar o avanço do equipamento na sobreposição de obstáculos ao longo dos alinhamentos, e também, como apoio no acionamento (*start*) da aquisição dos dados, através da linha utilizada no odômetro do *GPR*.

4.2.3.2 - Processamento dos Dados Geofísicos

Com as informações, das seções geofísicas, coletadas em campo com *GPR*, utilizou-se como parâmetro no processamento dos dados, por meio do *software Reflexw*, a sequência do organograma da Figura 4.16.



Figura 4.16 - Sequência de processamento dos dados das seções *GPR* – Adaptado de Rodrigues, 2004.

Uma das dificuldades no processamento dos dados está associada à definição da velocidade média de profundidade, devido às variações das características físicas dos materiais presentes no afloramento. Assim, para a migração do tempo em velocidade, utilizou-se uma hipérbole com velocidade 0,10 m/ns. Esse parâmetro foi repetido para todas as outras seções.

Segundo Rodrigues (2004), a velocidade é um importante fator utilizado na conversão do tempo de percurso das ondas refletidas em profundidade. Esses valores podem ser adquiridos por uma expressão ($V_a = 2h/t$), a qual relaciona os valores reais de profundidades (h) e o tempo (t) de percurso das reflexões medido no radargrama (seção geofísica) ou pela possibilidade de ajustamento das curvas de velocidades aos refletores hiperbólicos, e ainda, por meio de sondagens de velocidade, *CMP (Common Mid Point)*.

Para Annan (2001), a areia seca tem como velocidade 0,15 m/ns, sendo assim, se não fosse possível a identificação de uma hipérbole, no processamento dos radargramas, esse parâmetro poderia ser utilizado na conversão do tempo em profundidade para a área em estudo, visto que a geologia predominante no afloramento Morro Papaléo é o arenito.

Com base nos dados brutos (Figura 4.17A) obtidos do *GPR*, adotou-se as seguintes estratégias no processamento:

- **Filtro 1D: subtração da média** (*subtraction-mean (dewow - dessaturação)*) – Figura 17B) – elimina as frequências baixas, corrige o efeito de saturação da amplitude gerado pela indução eletromagnética entre as antenas;
- **Correção do tempo zero** (*static correction – Figura 17C*) – corrige a posição zero do terreno, ou seja, elimina o espaço entre a antena e o início da superfície do terreno;
- **Ganho – decaimento de energia** (*energy decay – Figura 18A*) – aumenta o ganho de intensidade do sinal, realçando os refletores de interesse;
- **Correção da Topografia** (*correct 3D topography - Figura 18B*) – corrige a topografia do terreno, ou seja, são inseridas as coordenadas x , y e z no radargrama, com base nos dados georreferenciados no campo;
- **Conversão do tempo em profundidade** (*time-deph – Figura 18C*) – transforma o tempo (nanossegundos) em profundidade (metros) em função da velocidade (metros/nanossegundos).

Para inserir a topografia em cada seção geofísica foi necessário criar um arquivo txt com as coordenadas (X , Y , Z) de cada perfil (alinhamento da seção), com base nos dados da topografia do terreno levantada com Estação Total. Deve-se observar que para o levantamento topográfico planialtimétrico do topo do afloramento foi utilizado o Datum SIRGAS2000, como sistema de referência para as coordenadas planas na Projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), o mesmo sistema utilizado no imageamento com *Laser Scanner* Terrestre, obtendo-se desta forma um referencial único para os dados de campo.

Com base nas informações obtidas dos dados brutos de cada perfil topográfico, iniciou-se o estaqueamento de cada seção geofísica, e para isso, utilizou-se o *software* Posição 2004. Esta ferramenta permitiu maior flexibilidade na organização das cotas das seções geofísicas, pois possibilitou inserir o espaçamento entre os pontos, de acordo com os traços utilizados em cada seção (longitudinal e transversal).

Com o perfil topográfico gerado no *software* Posição 2004, foi possível exportá-los para um arquivo TXT, com coordenadas tridimensionais (X , Y e Z), sendo necessário, posteriormente, renomear o mesmo para extensão UTM (formato utilizado na correção topográfica no *software Reflexw*), e assim, com os arquivos configurados executou-se a inserção da topografia do terreno para cada radargrama.

Finalizada a correção da topografia do terreno, executou-se a migração do tempo em profundidade, no qual utilizou-se como velocidade média de profundidade 0,10 m/ns (obtida na seção geofísica 15-13).

Concluída a conversão do tempo em profundidade, exportaram-se todos os radargramas, com o uso do *software Reflexw*, utilizando-se como extensão o formato *SEG Y (Society of Exploration Geophysicists Y format)*, sendo este, utilizado na importação de dados geofísicos no *software* de modelagem *GOCAD*.

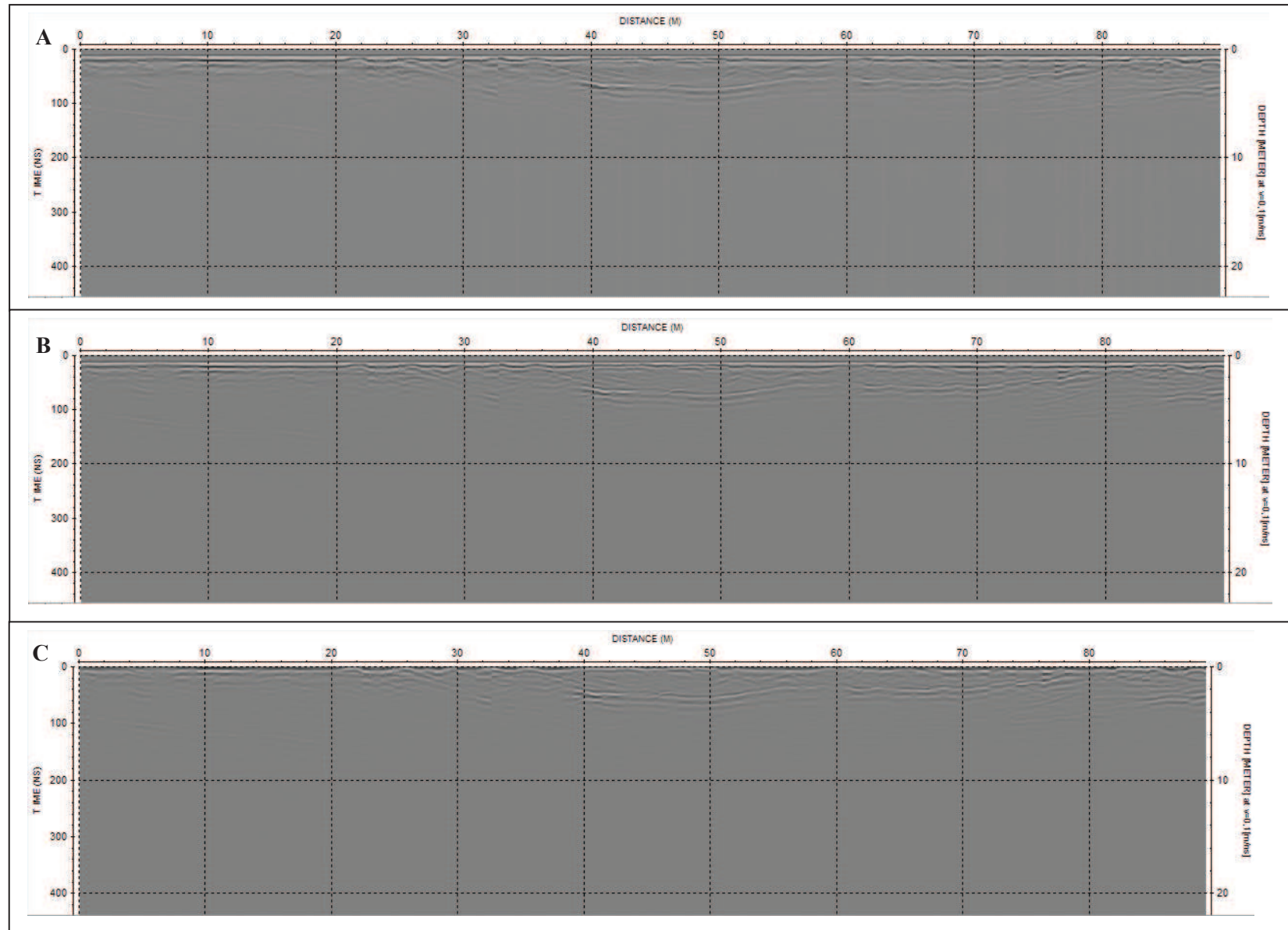


Figura 4.17 (A, B e C) - Radargramas da seção transversal (25-28) - (17A) Dados brutos - (17B) Subtração da média (*subtration-mean*) – (17C) Correção do tempo zero (*static correction*)

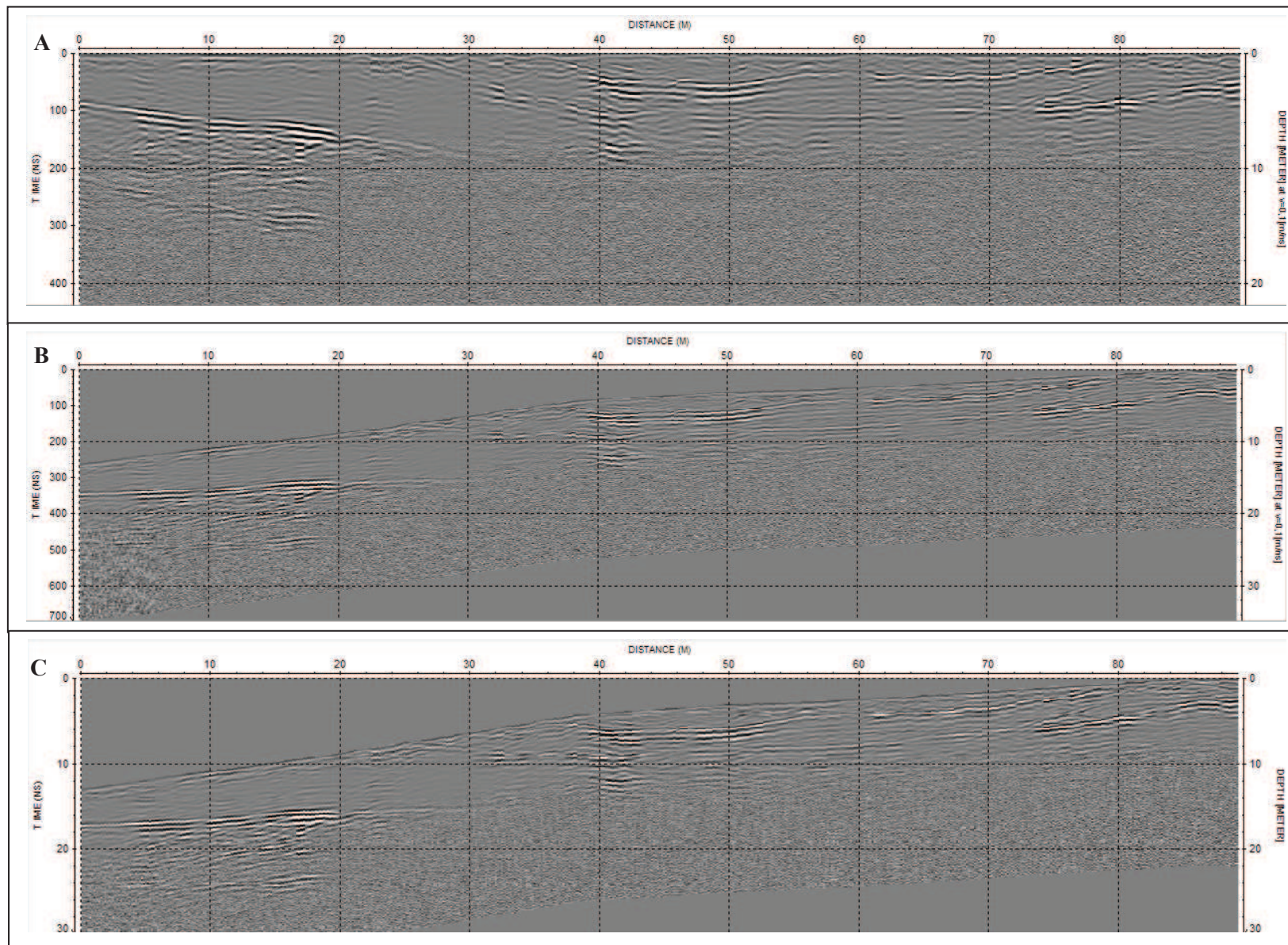


Figura 4.18 (A, B e C) - Radargramas da seção transversal (25-28) – (18A) Decaimento de energia (*energy decay*) – (18B) Correção da topografia (*correct 3D topography*) – (18C) Conversão do tempo em profundidade (*time-deph*)

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Integração dos Dados de Superfície e Subsuperfície do Afloramento

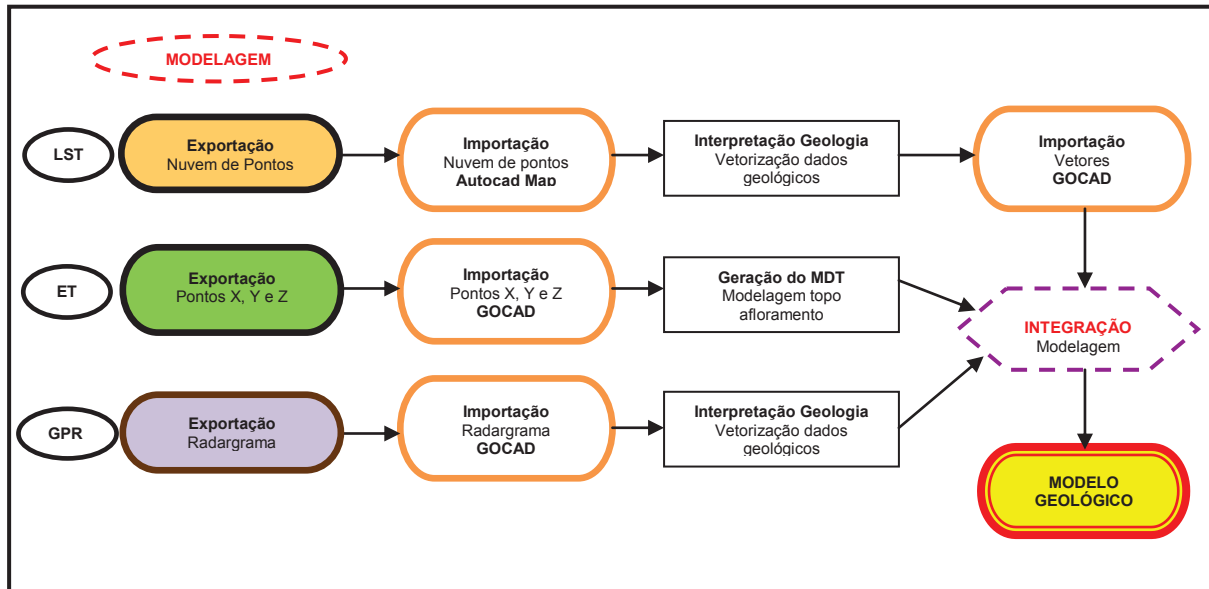


Figura 4.3- Fluxograma 3 - modelagem dos dados

Com o resultado dos dados de superfície e subsuperfície foi executada a modelagem dos elementos interpretados, conforme informações do fluxograma 3 (Figura 4.3). Para isso se utilizou a nuvem de pontos do *laser scanner* terrestre (*LST*), as coordenadas obtidas da estação total (*ET*) e os radargramas (seções geofísicas – *GPR*). Os elementos interpretados foram utilizados na caracterização das feições geológicas do afloramento, para obtenção de um modelo tridimensional.

No processamento da exportação da nuvem de pontos para o *software GOCAD*, foi necessário exportar os dados no formato TXT com as coordenadas X, Y, Z, e neste caso, não se exportou as informações RGB (*Red Green Blue*), advindas do equipamento *LST*, pois no *software GOCAD* não permitia a importação dessa informação. Porém, em algumas etapas da interpretação foi necessário trabalhar no *software Cyclone*, pela facilidade de manipulação da nuvem de pontos, que permitiu a vetorização do limite entre as fácies do afloramento.

Com a nuvem de pontos importada, realizou-se uma análise do georreferenciamento, usando-se como parâmetro os dados coletados em campo com estação total, apoiados nos pontos georreferenciados com *GNSS*. Para isso foi realizado, no campo, a medição da camada de carvão em sua parte superior, que posteriormente, adotou-se como referência na análise do posicionamento. Este procedimento foi necessário, para verificar se o georreferenciamento manteve-se correto após a importação no *software GOCAD*, pois as informações obtidas foram integradas posteriormente, com dados de subsuperfície.

Um dos elementos geológicos utilizado na interpretação do modelo foi a camada de carvão, pois esta superfície estava presente nas duas faces (leste e oeste) do afloramento, o que permitiu utilizá-la como *datum* de referência para as outras camadas interpretadas.

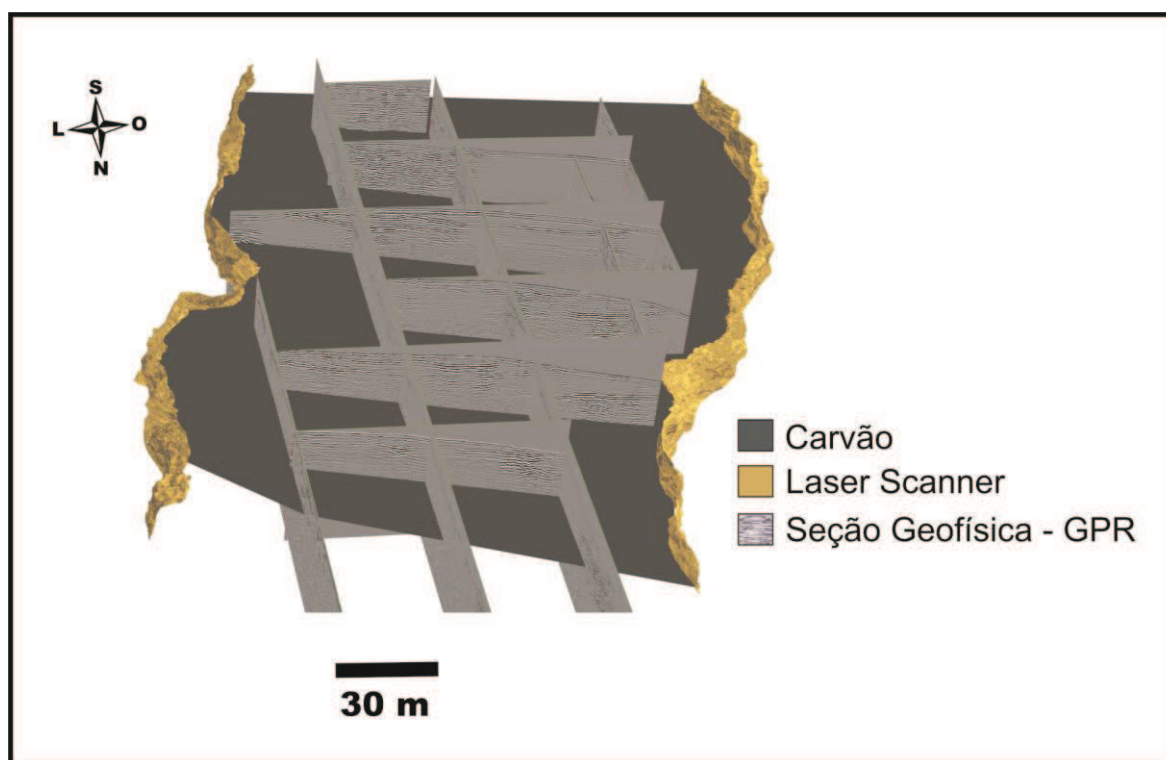


Figura 4.20 - Modelagem da camada de carvão

Deve-se ressaltar que o resultado da análise da exatidão posicional do georreferenciamento da nuvem de pontos, executado no capítulo 2 desse trabalho, constituiu uma importante etapa da modelagem, pois assim, manteve-se uma padronização no posicionamento da nuvem de pontos. Com as informações validadas, efetuou-se a triangulação da nuvem de pontos, e posteriormente, a limpeza das triangulações incorretas, e assim, obteve-se os dados do *laser scanner* terrestre, processado e triangulado, que permitiu a modelagem do carvão entre os dois lados do afloramento e a integração com as seções geofísicas (Figura 4.20).

Pode-se observar, na Figura 4.21, a interpretação de um elemento arquitetural (canal), observado tanto na fotografia digital, quanto na nuvem de pontos do *laser scanner* terrestre e a sua respectiva posição interpretada na seção geofísica (linha N1-N4), entre os comprimentos 50 e 60 m.

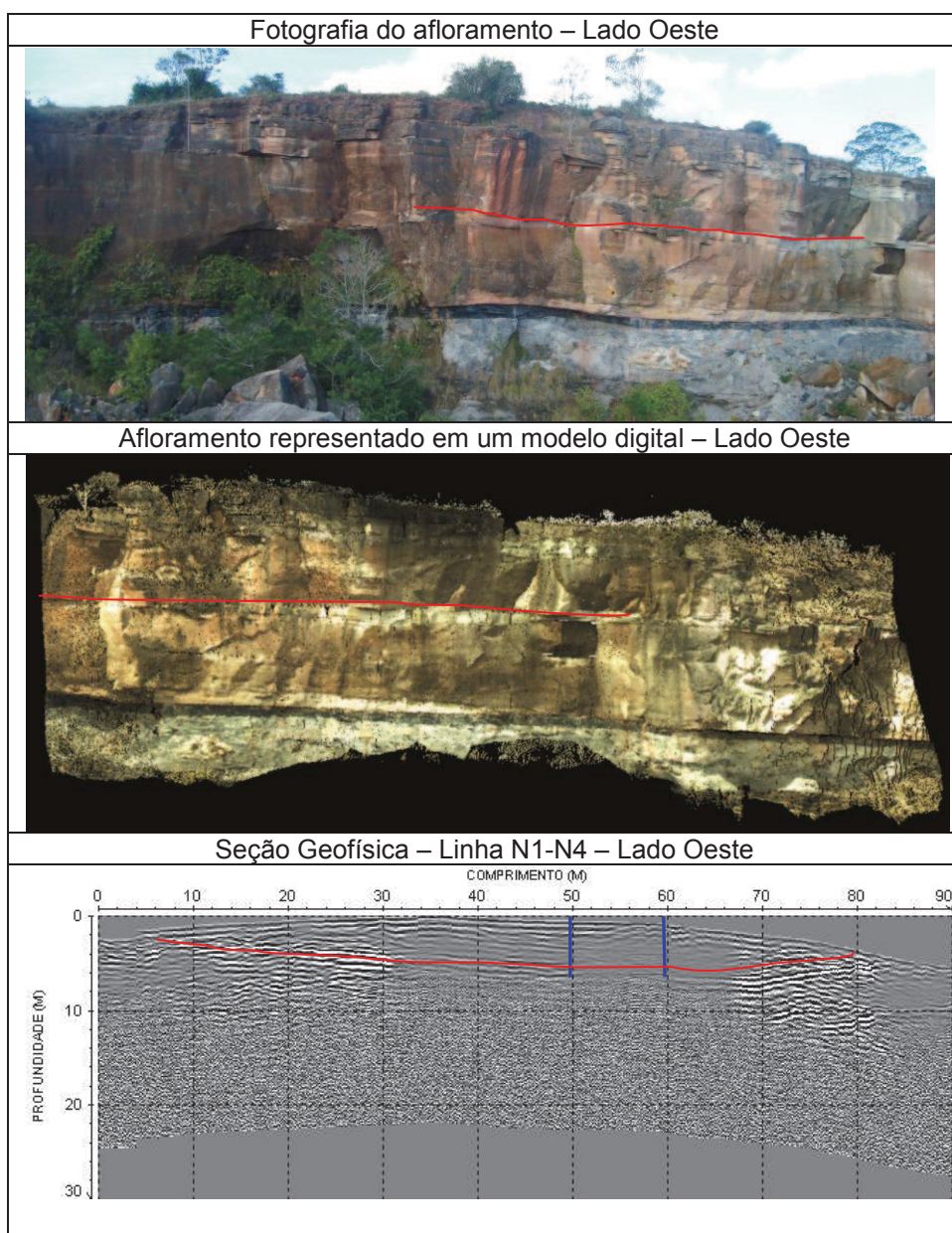


Figura 4.4 – Interpretação de elemento arquitetural (canal) em fotografia, modelo digital tridimensional e em seção geofísica

Nas seções geofísicas, identificaram-se refletores (Figura 4.5) correspondentes aos elementos arquiteturais internos ao afloramento, que se observou ao longo da área estudada. Com base na interpretação desses refletores, obtiveram-se algumas superfícies (Figura 4.23), representadas pela delimitação de camadas diferenciadas por sua granulometria e pelas características das rochas presentes no afloramento. A representação dessas camadas demonstra um padrão de refletores suavemente paralelos e contínuos, correlacionadas por hierarquia e separadas por cores em cada uma das seções geofísicas. Essas informações foram associadas com as interpretações obtidas na nuvem de pontos do *laser scanner* terrestre, obtendo-se por exemplo, a representação da superfície do carvão (Figura 4.23).

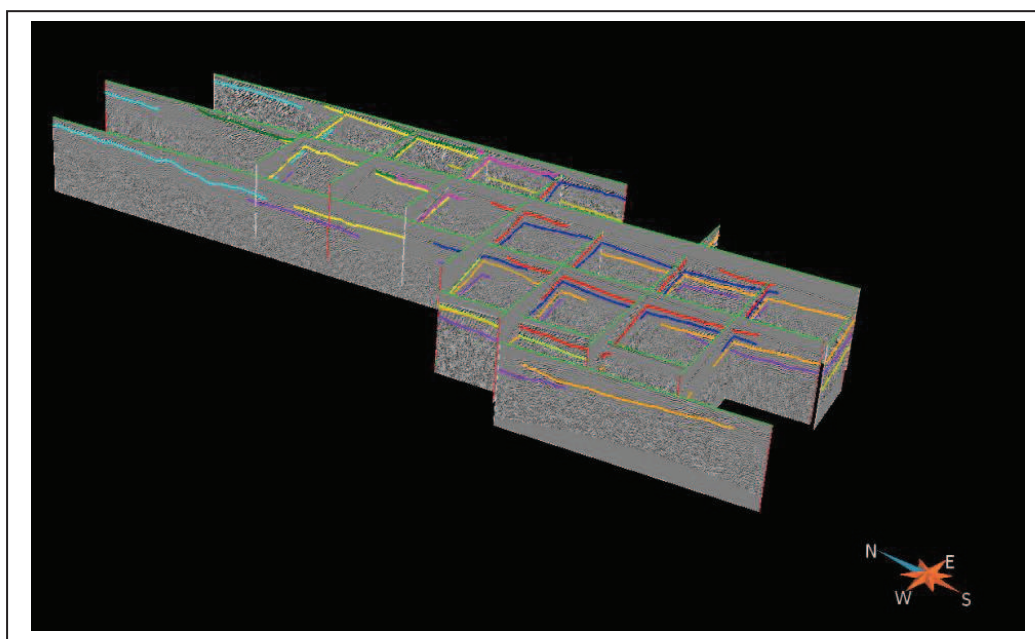


Figura 4.5 - Refletores interpretados nos dados geofísicos

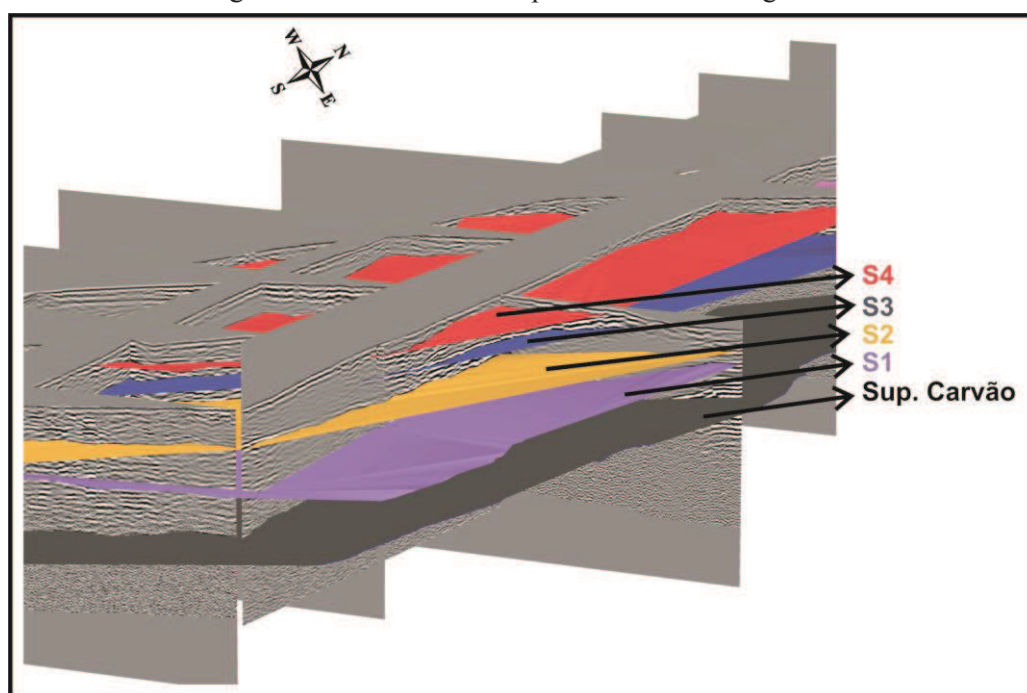


Figura 4.23 - Superfície interpoladas a partir da correlação entre as seções geofísicas e da nuvem de pontos do *laser scanner* terrestre

A mesma análise de posicionamento executada para os dados do *laser scanner* terrestre foi necessária para as seções geofísicas, pois o mesmo foi integrado a outros dados de sensoriamento remoto. Para isso, utilizou-se o levantamento topográfico da superfície do topo do afloramento como parâmetro de referência para análise. As curvas de nível foram exportadas para o *software GOCAD* e sobrepostas nas seções geofísicas (Figura 4.24 A, B e C).

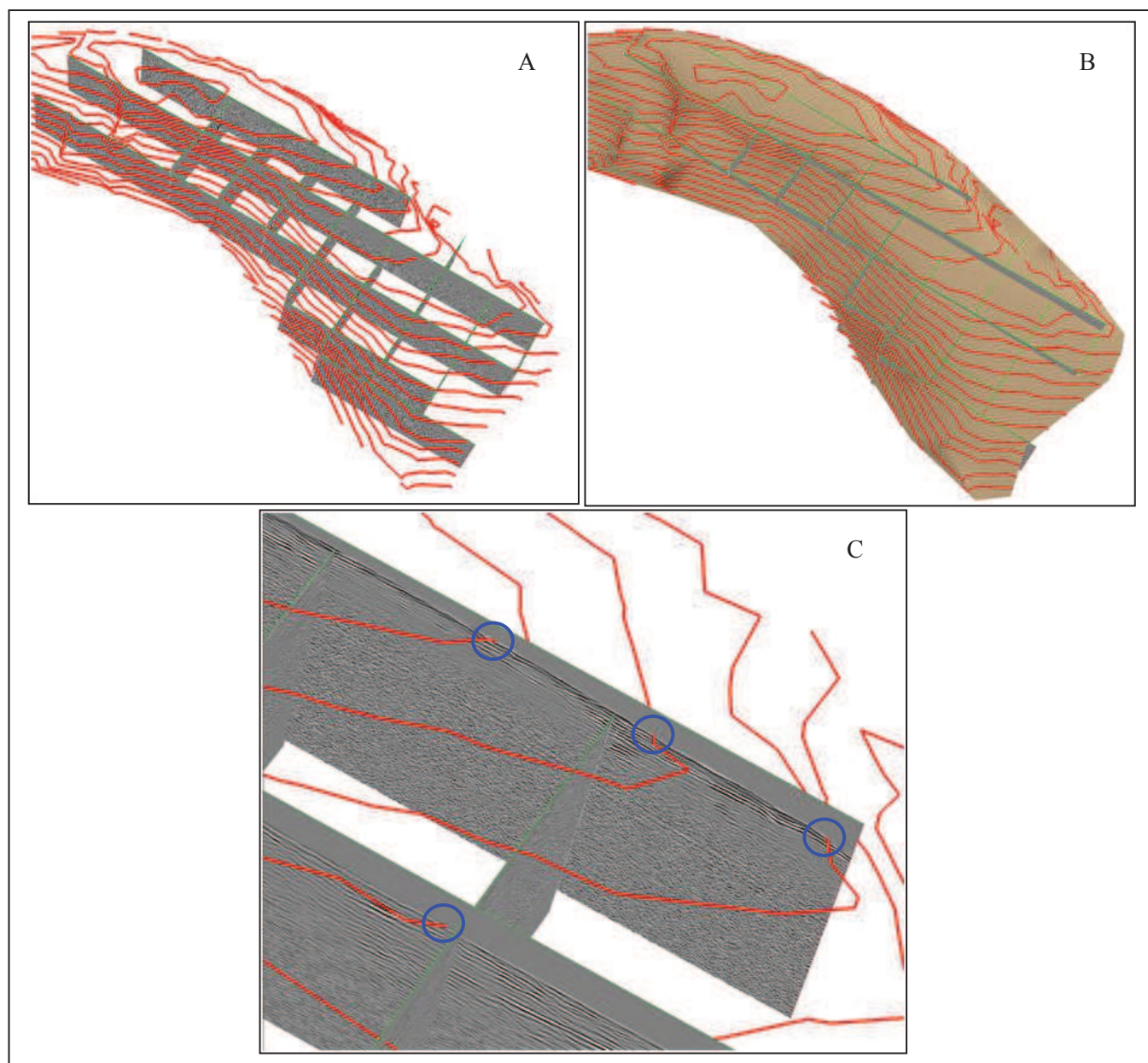


Figura 4.6 (A, B e C) - (4.24A) Curvas de nível inseridas sobre as seções geofísicas – (4.24B) Modelagem do topo do afloramento com as curvas de nível e as seções geofísicas – (4.24C) Curvas de nível sobrepostas à topografia do terreno das seções geofísicas

A partir dessa sobreposição executou-se uma análise de posicionamento da topografia inserida nas seções geofísicas com a curvas de nível. Como resultado, obteve-se uma média de 12,1 cm de diferença entre a altura das seções geofísicas e a cota das curvas de nível. Este resultado serviu como referência em relação aos erros obtidos durante o processamento das seções geofísicas, bem como, do processo de importação das seções para o *software* GOCAD. Esta análise permitiu um controle na integração dos dados de superfície e subsuperfície, visto que o mesmo foi executado com a nuvem de pontos obtidas com *laser scanner* terrestre.

Pode-se observar durante a interpretação dos dados geofísicos, elementos arquiteturais presentes no afloramento, conforme interpretações apresentadas por Akinpelu (2010) em ambientes fluviais, como canal de preenchimento e barra em pontal (acresção lateral), de acordo com modelos definidos por Miall (1996). Essas comparações podem ser observadas na Tabela 4.6.

Outra análise executada nos dados geofísicos foi a interpretação da orientação dos paleocanais obtidos entre a correlação dos paleotalvegues identificados nos radargramas (Figura 4.25). Para isso, adotou-se como parâmetro a parte inferior da linha interpretada, correlacionando-se com a mesma superfície nas seções geofísicas subsequentes.

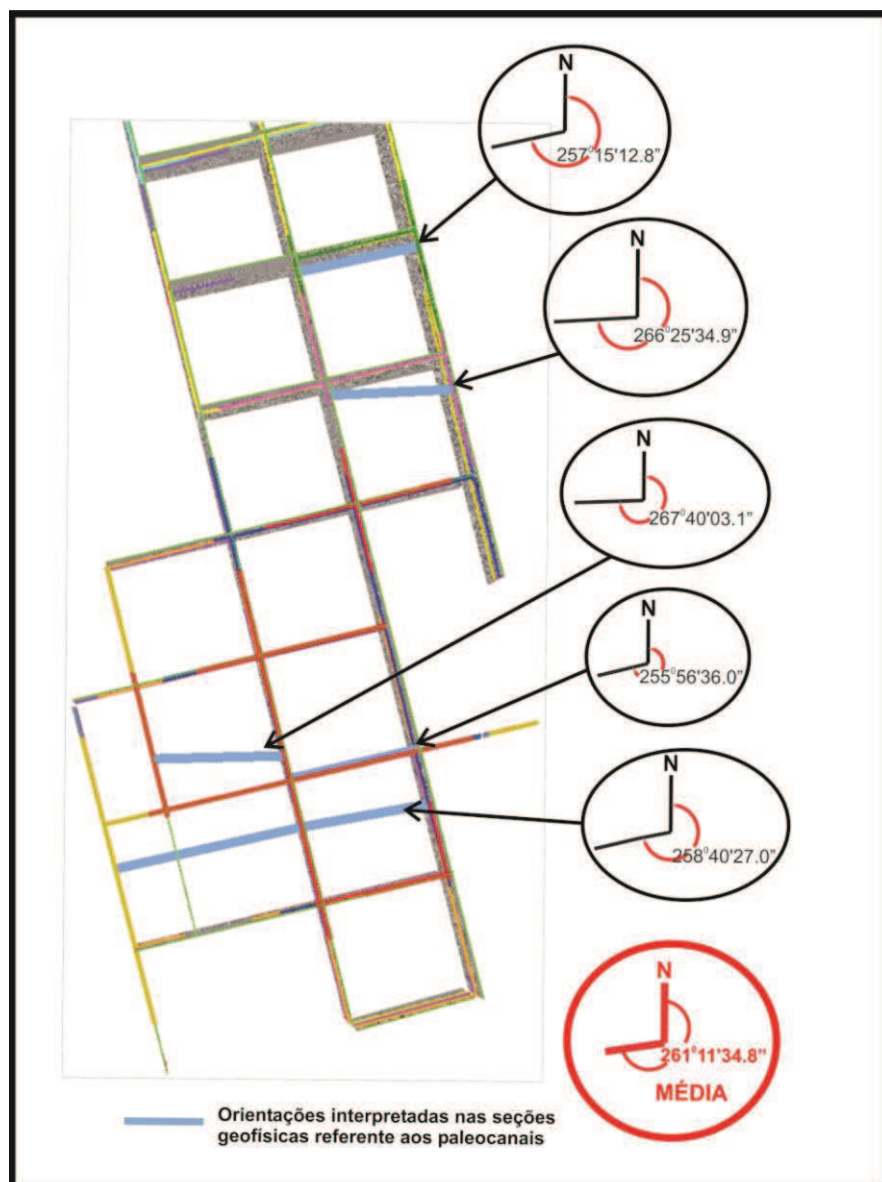
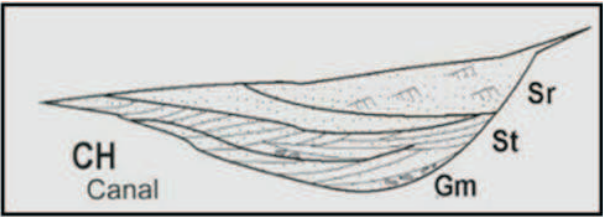
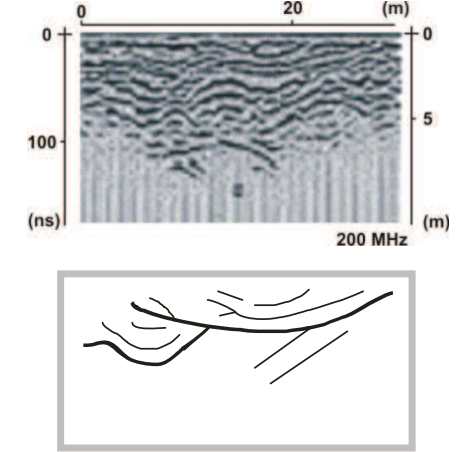
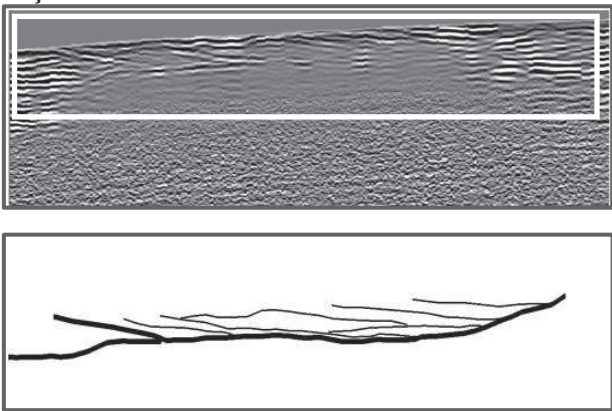
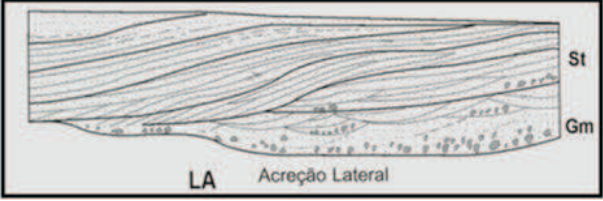
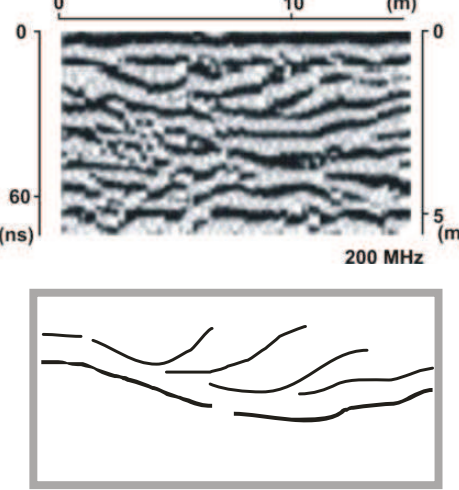
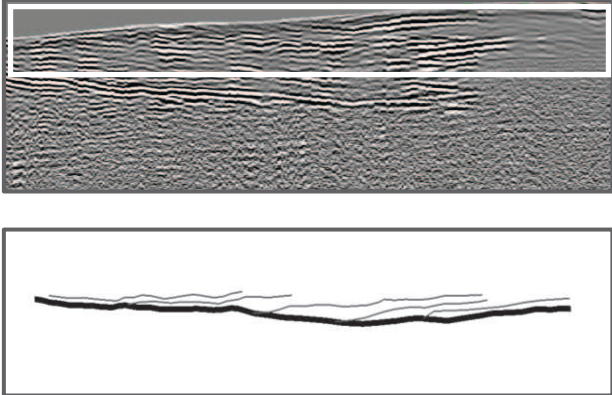


Figura 4.25 - Orientação dos paleocanais interpretada nas seções geofísicas

Pode-se observar com as orientações interpretadas, que a média obtida foi de $261^{\circ}11'34,8''$, coincidindo assim, com a mesma orientação do Paleovale Leão-Mariana Pimentel.

Tabela 4.6 - Comparação entre a teoria e a interpretação dos elementos arquiteturais encontrados no Morro Papaléo

Miall (1996)	Akinpelu (2010)	Morro Papaléo
Canal 	Canal 	Canal Seção 29-07 - 115 
Acreção Lateral 	Acreção Lateral 	Acreção Lateral Seção 25-38 - 122 

4.4 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a metodologia utilizada para a integração dos dados de superfície com o uso de *Laser Scanner* Terrestre e os dados de subsuperfície com o uso de *GPR* foi adequada para a modelagem digital de afloramento, na qual foi possível integrar, também, dados advindos de outras técnicas e equipamentos como Estação Total e *GNSS*, por meio da utilização de um referencial único para todo o levantamento de campo.

Para cada etapa de aquisição dos dados no campo, teve-se a preocupação de avaliar o posicionamento dos elementos, referente às coordenadas utilizadas em todo o processo. Isso foi avaliado com a obtenção de coordenadas obtidas ao longo do afloramento medido com a Estação Total e amarradas em pontos georreferenciados a partir do marco geodésico que foi implantado no topo do afloramento. Esta análise foi executada tanto para os dados de superfície quanto para os dados de subsuperfície.

Na interpretação dos dados do *GPR*, foi possível observar elementos arquiteturais como barra em pontal e a forma de canal, conforme foi apresentado no capítulo 1, referente à teoria sobre sistemas fluviais.

A manipulação dos dados foi executada em diversos softwares, porém, esta manipulação em diversas ferramentas permitiu que, em alguns casos, as informações das camadas do afloramento fossem interpretadas com mais detalhe, visto que uma única ferramenta não permite a interpretação de todos os dados vindos de fontes diferentes.

Atualmente o *Laser Scanner* Terrestre propicia a representação mais fidedigna da superfície externa de um afloramento, e o *software* utilizado para aquisição e registro permitiu uma série de operações. Porém, o processo é complexo e demorado, por fatores como a inexistência de uma interface amigável com outros *softwares*. Isto foi observado ao se exportar os dados para o *GOCAD*, que não permitiu a inserção das cores *RGB* (*red, green e blue*) advindos do *software Cyclone*, e também, ao se executar a triangulação da nuvem de pontos, pois para isso, foi necessário dividir o afloramento em diversas partes para a junção posterior.

Segundo Souza (2013) as alternativas para se contornar o problema envolvem um alto investimento em *hardware* ou a transformação da nuvem de pontos em uma superfície decimada (reduzida a frequência de amostragem). Neste trabalho a nuvem de pontos não foi reduzida, pois conseguiu-se manter a mesma quantidade de pontos, devido a capacidade de processamento do *hardware* utilizado no trabalho.

A interpretação das seções geofísicas no *software GOCAD* foi importante na análise executada, pois permitiu a visualização em diversas posições do afloramento por estar num referencial tridimensional, permitindo associar os elementos interpretados entre as seções transversais e longitudinais.

Durante o processamento da nuvem de pontos foi necessário editar a vegetação para facilitar a identificação das fácies do afloramento, porém, no lado leste do afloramento a grande quantidade de área verde dificultou a interpretação das camadas na nuvem de pontos, pois não foi possível identificá-las. Para resolver o problema do datum (camada do carvão) utilizado no trabalho como parâmetro, foi necessário medi-lo com estação total, o que permitiu gerar a superfície integrada nas duas partes (lados leste e oeste) do afloramento.

Quanto à camada de carvão, nas seções geofísicas foi possível identificá-la em três locais diferentes, sendo estas, integradas também, com a interpretação da nuvem de pontos e com o levantamento de campo executado com estação total, visto que uma única técnica não conseguiria coletar toda a camada devido a particularidade do afloramento. O procedimento utilizado neste trabalho poderá ser aplicado em outros afloramentos que necessitem ser mapeados num referencial tridimensional.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abmayr, T., Härtl, F.; Mettenleiter, M., Heinz, I., Hildebrand, A., Beumann, B., Fröhlich, C. 2004. Realistic 3D-Reconstruction - Combining Laserscan Data with RGB-Color Information. *ISPRS-International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol XXXV, Part B5: 198-203.

Akinpelu, O. C. 2010. *Ground Penetrating Radar Imaging of Ancient Clastic Deposits: A Tool for Three-Dimensional Outcrop Studies*. PhD Thesis, Geology Department. University of Toronto. Canada, 295 p.

Annan, A. P. 2001. *Ground Penetration Radar – Workshop Notes*. Sensors & Software Inc., Mississauga, Ontario, Canada.

Barchik, E., Moser, I., Santos, D. S. dos, Martins, B. D. 2007. Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS – 3D no Ramo da Mineração. *Anais. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3631-363

Bellian, J. A., Kerans, C., Jennette, D.C. 2005. *Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling*. *Journal of Sedimentary Research*, n. 75, p.166–176.

Bordin, F.; Teixeira, E. C.; Rolim, S. B. A.; Tognoli, F. M. W.; Souza, C. N.; Veronez, M. R. 2013. *Analysis of the influence of distance on data acquisition intensity forestry targets by a lidar technique with terrestrial laser scanner*. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences (cd-rom)*, v. XI-2/w1, p. 99-103, 2013.

Bristow, C. S. & Jol, H. M. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. *Geological Society, London, Special Publications* 2003; v. 211; p. 1-7 doi: 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.01.

Buckley, S. J., Howell, J.A., Enge, H.D., Leren, B.L.S. and Kurz, T.H. 2006. Integration of terrestrial laser scanning, digital photogrammetry and geostatistical methods for high-resolution modelling of geological outcrops. *In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Dresden, Germany, Vol. XXXVI, Part B5, proceedings CD.

Casagrande, J. 2010. *Análise Estratigráfica e Estrutural do Intervalo Carbonoso Portador de CBM – EO-Permiano da Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 137p.

Centeno, J. A. S., Wutke, J. D., Mitishita, E. A., Vögtle, T. 2010. *Two Methods to Estimate the Spot Size of Terrestrial Laser Scanners*. *Journal of Surveying Engineering*, v. 136, p. 126-131.

Ferrari, F., [Veronez, M. R.](#), Tognoli, F. M. W., Inocêncio, L. C., [Paim, P. S. G.](#), Silva, R. M. da. 2012. Visualização e Interpretação de Modelos Digitais de Afloramentos Utilizando Laser Scanner Terrestre. *Geociências (São Paulo. Online)*, v. 31, p. 79-91.

Freire, R. C. 2006. *Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR*. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 54p.

IBGE. Geociências. 2009. *Geodésia*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 10 de março de 2009.

Inocencio, L. C., Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Souza, M. K., Silva, R. M., Gonzaga JR, L., Silveira, C. L. B. 2014. *Spectral Pattern Classification in Lidar Data for Rock Identification in Outcrops*. The Scientific World Journal, v. 2014, p. 1-10, 2014.

Jacobi, L., Silva, R. M. da, Markoski, P.R., Veronez, M.R., Tognoli, F.M.W., Paim, P.S.G., Faccini, U.F., Lavina, E.L.C. 2010. Modelo Digital de Afloramento visando a análise e interpretação geológica: um estudo de caso baseado em dados de Laser Scanner 3D Terrestre, *Anais do 45º Congresso Brasileiro de Geologia* PAP916.pdf.

Jones, R. R., Mccaffrey, K. J. W., Imber, J., Wightman, R., Smith, S. A. F., Holdsworth, R.E., Clegg, P.; Paola, N. de, Healy, D., Wilson, R.W. 2008. *Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues*, Geological Society, London, Special Publications, January 1, 2008; 309(1): 87-98.

Kurz, T. H., Buckley, S. J., Howell, J. A., Schneider, D. 2008. Geological Outcrop Modelling and Interpretation Using Ground Based Hyperspectral and Laser Scanning Data Fusion. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B8): 1229-1234, 2008. Disponível em http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/12_WG-VIII-12/09.pdf Acesso em 27 de fevereiro de 2009.

Manfra & Cia Ltda, Manual do Usuário, Sistema de Automação Topográfica, POSIÇÃO, 2004.

Miall, A. D. 1996. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Berlin, Springer-Verlag, 582 p.

Nguyen, H. T.; Fernandez-Steege, T. M.; Wiatr, T.; Rodrigues, D. and Azzam R. 2011. *Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes – an example from Madeira Island (Portugal)*. Natural Hazards and Earth System Sciences. European Geosciences Union. p. 807-817.

- Paim, P. S. G., Faccini, U. F. & Netto, R. G., 2003 Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares - Estudo de Casos. In: Paim, P. S. G., Garcia, A. J. V., Faccini, U. F. & Lavina, E. L. C. (eds.) *GEOARQ: Uma Abordagem Integrada e Aplicada da Geologia Sedimentar*. UNISINOS. Programa de Pós-Graduação em Geologia, p.:15-25.
- Pringle, J. K., Westerman, A. R., Clark, J. D., Drinkwater, N. J., Gardiner, A. R. 2004. *3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK*. *Petroleum Geoscience*, 10, 343–352.
- Rodrigues, S. I., 2004. *Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 102 p.
- Silva, R. M. da, Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Jacobi, L., Lamberty D. 2011. Digital Outcrop Model at Geological Analysis and Interpretation: Case Study Based on Data from Terrestrial Laser Scanner 3D – *FIG Working Week 2011 - Bridging the Gap between Cultures*. Marrakech, Morrocos, 18-22 Maio 2011.
- Silva, R. M. da, Inocencio, L. C. , Lamberty, D., Jacobi, L., Tognoli, F. M. W., [Veronez, M. R.](#) 2012. LIDAR as an Efficient Tool for 3D Geological Models. *Coordinates Magazine*, v. VIII, p. 14-16, 2012.
- Teixeira, W. L. E. 2008. *Aquisição e construção de modelos estáticos análogos a reservatórios petrolíferos com tecnologia LIDAR e GEORADAR*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 99p.
- Thurmond, J. B., Drzewiecki, P. A., XU, X. 2005. *Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML)*. *Computers and Geosciences*, 31, 913–919.
- White, P. D. & Jones, R. R. 2008. *A cost-efficient solution to true color terrestrial laser scanning*, *Geosphere*, June 1, 2008, 4(3): 564 - 575.
- Wutke, J. D., Centeno, J.S. 2007. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 13, p. 151-164.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir sobre a tese apresentada que o estudo obtido no capítulo 2 demonstrou que a técnica LIDAR tem um potencial de aplicação ainda não explorado em sua plenitude para aplicações em Geologia. Os modelos digitais de afloramentos, obtidos com essa técnica, são ferramentas eficientes para ajudar no planejamento do trabalho de campo, bem como nas atividades de interpretações subsequentes. A alta resolução da nuvem de pontos permite medições de diferentes características geológicas, como a espessura da camada, tamanho de clastos e orientação de fraturas. Obteve-se valores baixos de desvio padrão, assim como, a variância entre os pontos de controle, medidos com Estação Total e os pontos medidos com *laser scanner* terrestre.

As interpretações geológicas ainda são limitadas, pois a maioria delas é realizada em *softwares* convencionais baseados em plataforma CAD, para manipulação e processamento da nuvem de pontos. Consequentemente, algumas ferramentas estão disponíveis para fins de interpretação e elas raramente são desenvolvidas, considerando as necessidades de estudos geológicos. Além disso, grandes quantidades de dados têm sido um problema adicional devido às limitações da unidade central de processamento (CPU).

O desenvolvimento de rotinas computacionais, tanto em *hardware* como em *software* são fundamentais para aperfeiçoar o processamento e interpretação de Modelos Digitais de Afloramentos. A alta precisão obtida na aquisição dos dados pode garantir a qualidade do Modelo Digital de Afloramento, que, posteriormente, poderá ser integrado com outros dados advindos de fontes diferentes como, por exemplo, GPR (*Ground Penetration Radar*), Estação Total, entre outros em abordagens multi-escalares que podem variar de milímetros a centenas de metros. A integração de outros dados pode melhorar a qualidade da superfície gerada entre as fácies de um afloramento, visto que a nuvem de pontos, obtidas com *laser scanner* terrestre, só permite analisar informações de superfície, ou seja, somente a “casca” do afloramento.

Referente ao capítulo 3 conclui-se que o resultado obtido, com base na utilização de imagens fotográficas na reconstrução 3D para Modelagem Digital de Afloramento, pode ser utilizado na área da Geologia, no auxílio da interpretação de características geológicas, como espessura de camadas e na identificação de diferentes fácies. A nuvem de pontos gerada permitiu também, avaliar a precisão do posicionamento, com base nos pontos coletados em campo, na superfície do afloramento, com o uso de Estação Total. Com esses valores, e analisando-se o resultado, chegou-se a um erro de posicionamento linear de 40cm, entre as coordenadas do Modelo Digital de Afloramento com base na reconstrução 3D e das coordenadas obtidas com Estação Total.

Em comparação com a precisão relativa da nuvem de pontos (técnica de reconstrução 3D) obteve-se, no modelo gerado, um erro menor do que 5 cm, comparando-se com a nuvem de pontos obtidas a partir do *laser scanner* terrestre, o que permite executar medidas na Modelo Digital do Afloramento dentro destes parâmetros, o que atende as necessidades para se interpretar um afloramento, comparando-se com medições executadas com as técnicas convencionais.

A técnica utilizada pode ajudar na obtenção de informações de objetos localizados em lugares de difícil acesso, principalmente relacionado aos problemas que envolvem o tamanho do afloramento e por questões de segurança.

Comparando-se com o custo de um equipamento LIDAR com uma câmera digital a diferença torna-se muito grande, sendo assim, está técnica permite obter um resultado com boa qualidade a um custo baixo. Outro fator relevante está relacionado à facilidade de transporte de uma máquina fotográfica digital, comparando-se com um equipamento *laser scanner* terrestre, que também, envolve o transporte de outros acessórios como tripé, baterias entre outros, para aquisição dos dados.

Com a análise do resultado, conclui-se, também, que a técnica de modelagem com base em fotografias digitais pode auxiliar na obtenção da nuvem de pontos em locais onde há oclusões no afloramento, como o sombreamento ou obstruções físicas, que nestes casos, dificultam a aquisição com o uso de *laser scanner* terrestre.

O georreferenciamento da nuvem de pontos, obtidas da técnica de modelagem com base em fotografias digitais, permitiu a sobreposição da nuvem de pontos, obtidas da técnica LIDAR, por ser utilizado o mesmo sistema de referência, sendo assim, o modelo gerado, também pode ser integrado a outras fontes de dados, como por exemplo, GPR, desde que o sistema de referência seja o mesmo.

Portanto, deve-se utilizar o bom senso na utilização das ferramentas, pois mesmo com a utilização de fotografias digitais, tendo um resultado compatível com o *Laser Scanner* Terrestre, existem situações que somente a técnica *LIDAR* permitirá a coleta de dados, como em locais de longa distância entre o afloramento e a posição de imageamento. A técnica utilizada pode complementar o trabalho executado com o *Laser Scanner* Terrestre, pois cada afloramento tem a sua particularidade, quanto a obstruções e dificuldades de imageamento.

Durante a integração dos dados de superfície e subsuperfície, executado no capítulo 4 desta tese, observou-se diversas dificuldades que tiveram que ser contornadas com o uso de outros *softwares*.

A modelagem digital do afloramento foi executada numa única plataforma, porém, foi necessário utilizar outras ferramentas, no processamento dos dados de superfície e subsuperfície. A preocupação de garantir uma qualidade posicional dos elementos, foi atrelada a adoção de um referencial único, que possibilitou uma posterior coleta em campo de novas informações, para validação do mesmo e inserção no modelo.

Foi possível gerar superfícies do afloramento com as interpretações executadas na nuvem de pontos do *laser scanner* terrestre e nas seções geofísicas do *GPR*. Um dos referenciais utilizados na integração dos dados foi a camada de carvão, que foi adotada como *datum* do afloramento, por estar visível nos dois lados (lado leste e oeste) da área de estudo.

Observou-se, na modelagem digital do afloramento, com base nas seções geofísicas, que a média das medidas de orientação dos paleocanais foi de $261^{\circ}11'34,8''$, orientação essa que está em conformidade com o paleovale, onde se localiza o afloramento Morro Papaléo.

Também, pode-se observar durante a integração dos dados, que os elementos arquiteturas, como barra em pontal e canal, foram possíveis de serem identificados nas seções geofísicas e interpretados, conforme a modelo teórico de Miall (1996) e as análises executadas por Akinpelu (2010).

A metodologia utilizada nessa tese poderá ser aplicada em outros trabalhos que necessitem obter modelos digitais de afloramento com base nas técnicas de sensoriamento remoto não orbital, utilizando-se *laser scanner* terrestre e *ground penetration radar* (*GPR*).

5.1 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Como limitações do trabalho de campo, do processamento e da análise dos dados, tem-se as seguintes informações:

- a presença de muita vegetação no lado leste do afloramento, durante o trabalho de campo com o uso do *laser scanner* terrestre, não permitiu uma aquisição adequada devido as obstruções, e em alguns casos, ocorrendo a oclusão dos elementos do afloramento, o que impossibilitou uma posterior interpretação;
- a dificuldade de locomoção no topo do afloramento, durante a aquisição dos dados com equipamento *GPR*, devido as variações da topografia do terreno, assim como, a presença de arbustos nas linhas das seções geofísicas, obrigando a ter uma equipe maior no campo para auxiliar na coleta dos dados, evitando que a antena se descolasse;
- os “buracos” gerados pela limpeza da nuvem de pontos, provocado pela presença de arbustos e árvores no entorno do afloramento, sendo este procedimento necessário para facilitar a interpretação das informações geológicas;
- a grande quantidade da nuvem de pontos obtidas com o *laser scanner* terrestre, dificultou a sua manipulação no início do projeto, pois não se tinham *hardwares* potentes como os que se tem hoje nos laboratórios;
- a falta de experiência na análise das seções geofísicas, que dificultou, no início, a interpretação dos elementos arquiteturais;
- a dificuldade ao se analisar o modelo tridimensional no software *GOCAD*, pois o mesmo travava ao fazer muitas movimentações no modelo.

Portanto, fica como recomendação para melhoria e complementação do trabalho, a obtenção de mais dados do afloramento, utilizando-se também, de outras técnicas para se gerar nuvem de pontos, como o que foi utilizado no capítulo 3, com o uso de fotografias digitais para reconstrução 3D, e nesse caso pode auxiliar na solução das oclusões gerado com o uso do laser scanner terrestre. É importante lembrar que o uso das fotografias digitais devem estar associadas a pontos de controle georreferenciados, medidos na superfície do afloramento com o uso de Estação Total. Outra aplicação ao modelo seria agregar novos dados ao modelo existente, como por exemplo aqueles obtidos por sensores hiperespectrais.