



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AQUISIÇÃO E CONSTRUÇÃO DE MODELOS ESTÁTICOS ANÁLOGOS A
RESERVATÓRIOS PETROLÍFEROS COM TECNOLOGIA LIDAR E GEORADAR**

Autor: Washington Luiz Evangelista Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho

Natal - RN, Março de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**AQUISIÇÃO E CONSTRUÇÃO DE MODELOS ESTÁTICOS ANÁLOGOS A
RESERVATÓRIOS PETROLÍFEROS COM TECNOLOGIA LIDAR E GEORADAR**

Natal - RN, Março de 2008

TEIXEIRA, Washington Luiz Evangelista - Aquisição e construção de modelos estáticos análogos a reservatórios petrolíferos com tecnologia lidar e georadar. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo. Linha de Pesquisa: Engenharia e Geologia de Reservatórios e de Exploração de Petróleo e Gás Natural, sublinha: Caracterização de Reservatórios Aplicada à Recuperação Avançada de Petróleo. Natal-RN, Brasil.

Orientador: Prof. **Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho** (PPGCEP/UFRN)

RESUMO

Esta dissertação desenvolve uma metodologia para a construção de modelos estáticos digitais 3D análogos a reservatórios petrolíferos utilizando as tecnologias LIDAR e GEORADAR, assim, apresenta a técnica como novo paradigma no estudo de afloramentos, com o potencial de integrar de forma consistente dados plani-altimétricos, geofísicos, e produtos de sensoriamento remoto, permitindo a validação de interpretações 2D contra o espaço 3D, visualização de geometrias deposicionais complexas, inclusive em ambiente de realidade virtual imersivo. Para tanto, são apresentadas as questões mais relevantes da fundamentação teórica das duas tecnologias, e desenvolvido um estudo de caso utilizando os sistemas TerraSIRch SIR System-3000 de fabricação Geophysical Survey Systems, e HDS3000 Leica Geosystems que implementam, respectivamente, as duas tecnologias, cabendo a integração das mesmas ao software GOCAD. O afloramento estudado apresenta grande exposição, e está localizado na borda sudeste da Bacia do Parnaíba, no Parque Nacional da Serra das Confusões. A metodologia contempla todas as etapas do processo construtivo disponibilizando um modelo estático digital 3D análogo a reservatórios petrolíferos, que fornece dados de geometrias deposicionais ou deformacionais em diferentes escalas de observação, utilizados pelos sistemas de simulação de reservatórios petrolíferos.

Palavras-chave: LIDAR, GEORADAR, Geomodelagem.

Data da defesa: 31 de março de 2008

ABSTRACT

The present work develops a methodology to establish a 3D digital static models petroleum reservoir analogue using LIDAR and GEORADAR technologies. Therefore, this work introduce the methodolgy as a new paradigm in the outcrop study, to purpose a consistent way to integrate plani-altimetric data, geophysics data, and remote sensing products, allowing 2D interpretation validation in contrast with 3D, complexes depositional geometry visualization, including in environmental immersive virtual reality. For that reason, it exposes the relevant questions of the theory of two technologies, and developed a case study using TerraSIRch SIR System-3000 made for Geophysical Survey Systems, and HDS3000 Leica Geosystems, using the two technologies, integrating them GOCAD software. The studied outcrop is plain to the view, and it's located at southeast Bacia do Parnaíba, in the Parque Nacional da Serra das Confusões. The methodology embraces every steps of the building process shows a 3D digital static models petroleum reservoir analogue, provide depositional geometry data, in several scales for simulation petroleum reservoir.

AGRADECIMENTOS

Nesse meu espaço venho expressar os meus mais sinceros agradecimentos e sem preocupação com qualquer critério de importância.

A Deus, pelo privilégio de existir. À minha Mãe do Céu a quem eu sempre recorro nos momentos de aflição.

Aos meus pais, principalmente minha Mãe Helena, que sempre me priorizou, e ao seu modo me ajudou muito. Obrigado Mami.

Ao meu orientador, Prof. Pinheiro. Com certeza uma das primeiras pessoas a conhecer o meu sonho de um mestrado, isso ainda na época da nossa graduação. Muito obrigado também por viabilizar, de todas as formas, esse trabalho. Quero parabenizar esse cara pela forma profissional cirúrgica como me orientou na produção desse trabalho, foi decisivo. Muito obrigado mesmo.

Em especial agradeço à minha esposa Aline, companheira de todas as horas, pelo seu carinho, incentivo, paciência, compreensão, racionalidade, entre outras iniciativas que muito contribuem para o meu sucesso. Obrigado ainda pelas longas conversas.

À minha amiga Elianeiva Odísio, obrigado especial pela amizade sincera que me orgulha muito, sua intervenção direta possibilitou o desenvolvimento desse trabalho.

Um obrigado especial ao geólogo Vivaldo Rocha por toda contribuição no desenvolvimento dos modelos digitais dos análogos no GoCad.

Aos amigos do GEA pelo conhecimento compartilhado, pela convivência agradável, e companheirismo. Um obrigado especial para a Cristiane e o Evanimack pela ajuda com as figuras, Lucila Monte Egito pelo valor que agrega aonde chega, parabéns menina. Não poderia deixar de esquecer o Marcelo Baiano pela parceria nas disciplinas que cursamos.

À minha amiga primeira Ana Inês, que sempre me incentivou e contribuiu diretamente para o meu sucesso, mas de tão generosa que é, não me deixou saber.

Aos meus filhos Emmanuel e Bruno pela compreensão e confiança.

Aos amigos da Santiago & Cintra, Anderson Schwab e Marcello Oliveira por compartilhar o conhecimento no uso correto do *Laser Scanner*.

Agradecimento especial ao nosso coordenador Wilson da Mata pelo carinho e profissionalismo com que trata seus pós-graduandos. Fica meu reconhecimento pelo ser humano especial que conheci.

À Viviane Medeiros, nossa fada madrinha, que, sempre, com um sorriso enorme nos recebe e trata com carinho, também com profissionalismo e pró atividade trata da nossa relação com o Curso. Parabéns.

E finalmente, aos nomes ausentes, registro o meu perdão.

“O caminho só existe quando você passa”

Chico Amaral e Samuel Rosa

SUMÁRIO

ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
1 INTRODUÇÃO	2
2 ASPECTOS TEÓRICOS	8
2.1 LIDAR - <i>LIGHT DETECTION AND RANGING</i>	8
2.1.1 <i>Princípio de funcionamento</i>	8
2.1.2 <i>Nuvens de pontos</i>	9
2.1.3 <i>Registro de nuvens de pontos</i>	11
2.1.4 <i>Georreferenciamento de nuvem de pontos</i>	15
2.1.5 <i>Reflectância</i>	16
2.2 GPR- <i>GROUND PENETRATION RADAR</i>	17
2.2.1 <i>Parâmetros de aquisição</i>	29
2.2.2 <i>Processamento dos dados</i>	32
2.3 <i>MODELAGEM ESTÁTICA 3D</i>	33
3 ESTADO DA ARTE	36
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	40
4.1 <i>FLUXOGRAMA DE TRABALHO</i>	40
4.2 <i>INSTRUMENTAÇÃO</i>	42
4.2.1 <i>Tecnologia LIDAR</i>	42
4.2.2 <i>GEORADAR</i>	43
4.2.3 <i>Estação Total</i>	43
4.2.4 <i>Integração de dados e modelagem 3D</i>	44
4.3 <i>MÉTODOS</i>	45
4.3.1 <i>Trabalho de campo</i>	45
4.3.2 <i>Processamento</i>	58
4.3.3 <i>Modelagem estática 3D</i>	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6 CONCLUSÃO	80
Referências Bibliográficas	84

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE TEMPO DE PERCURSO.	8
FIGURA 2-2 – MODELO FUNCIONAL DA TECNOLOGIA LIDAR.....	9
FIGURA 2-3 – NUVEM DE PONTOS CORRESPONDENTE À AQUISIÇÃO DE UMA FRENTE DE DUNA NO MUNICÍPIO PORTO DO MANGUE - RN.....	10
FIGURA 2-4 – NUVEM DE PONTOS DE UMA FRENTE DE DUNA DESTACANDO OS PONTOS INDIVIDUAIS QUANDO VISTOS PRÓXIMOS, E O ASPECTO DE SUPERFÍCIE QUANDO VISTO À DISTÂNCIA.....	10
FIGURA 2-5 – IMAGENS DE DUAS NUUVENS DE PONTOS (I E II) E O REGISTRO DE AMBAS (III), DE UM AFLORAMENTO NA SERRA DAS CONFUSÕES - PI.....	12
FIGURA 2-6 – TARGETS DO TIPO CIRCULAR COM GIRO (ESQUERDA), QUADRADO COM GIRO (CENTRO), E MAGNÉTICO (DIREITA).....	12
FIGURA 2-7 – ASPECTO VISUAL DO RECURSO TARGET VIRTUAL.....	15
FIGURA 2-8 – NUVEM DE PONTOS DO AFLORAMENTO NA SERRA DAS CONFUSÕES – PI, TENDO A REFLECTÂNCIA COMO TEXTURA.....	16
FIGURA 2-9 – DIAGRAMA DE BLOCO DE UM SISTEMA GPR TÍPICO.	18
FIGURA 2-10 – ILUSTRAÇÃO CONCEITUAL DE UM PULSO EMITIDO (Tx) PELO GPR E REFLETIDO (Rx) EM SUBSUPERFÍCIE.....	18
FIGURA 2-11 – REPRESENTAÇÕES DE UMA AQUISIÇÃO GPR. ACIMA UM CONJUNTO DE TRAÇOS MOSTRADOS COMO LINESCAN E, ABAIXO NA FORMA DE O-SCOPE.	18
FIGURA 2-12 – ILUSTRAÇÃO CONCEITUAL DE UMA AQUISIÇÃO COM GPR.	19
FIGURA 2-13 – EXEMPLO DE RADARGRAMA EM UMA DUNA NA MINA MILLENIUM, MUNICÍPIO DE MATARACA - PB.....	19
FIGURA 2-14 – COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE E ATENUAÇÃO FRENTE À FREQUÊNCIA.....	24
FIGURA 2-15 – MODELO PARA AS RESOLUÇÕES VERTICAL E LATERAL EM GPR.....	27
FIGURA 2-16 – FLUXOGRAMA PARA O PROCESSAMENTO DE DADOS GPR.	32
FIGURA 2-17 – ILUSTRAÇÃO DE OBJETOS SIMPLES UTILIZADOS NA MODELAGEM 3D. CONJUNTO DE PONTOS, CURVAS, SUPERFÍCIES, E SÓLIDOS.....	34
FIGURA 4-1 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DO FLUXO METODOLÓGICO.....	40
FIGURA 4-2 – DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA LASER SCANNER HDS3000.....	42
FIGURA 4-3 – UNIDADE DE CONTROLE E VISUALIZAÇÃO DO SISTEMA GPR TERRASIRCH SIR SYSTEM-3000.....	43
FIGURA 4-4 – ESTAÇÃO TOTAL TOPCON CTS 3007 UTILIZADA PARA CORREÇÃO TOPOGRÁFICA.....	44
FIGURA 4-5 – ÁREA DE TRABALHO LOCALIZADA NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DAS CONFUSÕES, MUNICÍPIOS DE CARACOL, ESTADO DO PIAUÍ. IMAGEM DE SATÉLITE QUICKBIRD.....	46
FIGURA 4-6 – VISTA GERAL DA ÁREA DE LEVANTAMENTO, COM AFLORAMENTO MODELADO EM PRIMEIRO PLANO.....	47
FIGURA 4-7 – DIAGRAMA CONTENDO O CONTOURNO DO AFLORAMENTO COM A INDICAÇÃO DAS ESTAÇÕES.....	49
FIGURA 4-8 – AMBIENTE DE CONFIGURAÇÃO, CONTROLE, E AQUISIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO. EM DESTAQUE, A FOTOGRAFIA OBTIDA NA ESTAÇÃO DENOMINADA PONTO_SETE.....	51
FIGURA 4-9 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_ZERO, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.....	51
FIGURA 4-10 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_UM, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.....	52
FIGURA 4-11 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_DOIS, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.....	52

FIGURA 4-12 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_ZERO, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.	52
FIGURA 4-13 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_QUATRO, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.	52
FIGURA 4-14 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_CINCO, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.	53
FIGURA 4-15 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_SEIS, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.	53
FIGURA 4-16 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_SETE, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.	53
FIGURA 4-17 – VISÃO PARCIAL DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA NA ESTAÇÃO PONTO_OITO, COM A CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A OBTENÇÃO.	54
FIGURA 4-18 – DIAGRAMA CONTENDO O CONTOURNO DO AFLORAMENTO COM AS INDICAÇÕES DAS LINHAS DE AQUISIÇÃO.	55
FIGURA 4-19 – SONDADEM DE VELOCIDADE DO TIPO COM, GRÁFICO TÍPICO DO TEMPO DE CHEGADA EM FUNÇÃO DA SEPARAÇÃO DAS ANTENAS.	56
FIGURA 4-20 – AQUISIÇÃO DE PERFIL GPR NA LINHA 2 COM ANTENA DE 100 MHZ.	58
FIGURA 4-21 – AQUISIÇÃO DE PERFIL GPR NA LINHA 1 COM ANTENA DE 400 MHZ.	58
FIGURA 4-22 – REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS DAS ESTAÇÕES PONTO_UM, PONTO_DOIS, E PONTO_TRÊS, NO AMBIENTE DE REGISTRO DE NUVEM DE PONTOS (<i>REGISTRATION</i>) DO <i>SOFTWARE CYCLONE</i>	59
FIGURA 4-23 – REGISTRO DA AQUISIÇÃO DE FEVEREIRO DE 2006, DESTACANDO OS PONTOS DE CONTROLE UTILIZADOS.	61
FIGURA 4-24 – REDE DE PONTOS PARA REGISTRO DAS AQUISIÇÕES DE 2006 E 2007.	61
FIGURA 4-25 – NUVEM DE PONTOS REGISTRADA DAS DUAS AQUISIÇÕES SEM TRATAMENTO, APRESENTANDO COMO TEXTURA A IMAGEM OBTIDA COM A CÂMERA INTEGRADA DO <i>LASER SCANNER</i>	62
FIGURA 4-26 – NUVEM DE PONTOS REGISTRADA DAS DUAS AQUISIÇÕES COM TRATAMENTO, APRESENTANDO COMO TEXTURA A IMAGEM OBTIDA COM O <i>LASER SCANNER</i>	63
FIGURA 4-27 – AMBIENTE DO RADAN PARA PROCESSAMENTO DE PERFIS GPR.	65
FIGURA 4-28 – ILUSTRAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E DO FENÔMENO GPR <i>FOOTPRINT</i>	67
FIGURA 4-29 – RADARGRAMA DAS LINHAS 1 E 2 COM ANTENA DE 400 MHZ. NOTAR A PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO DE ATÉ 7M.	68
FIGURA 4-30 – RADARGRAMA LINHAS 1 E 2 COM ANTENA DE 200 MHZ. NOTAR A PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO DE ATÉ 14M.	68
FIGURA 4-31 – RADARGRAMA DAS LINHAS 1 E 2 COM ANTENA DE 100 MHZ. OBSERVAR A PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO DE APROXIMADAMENTE 28M.	69
FIGURA 4-32 – ILUSTRAÇÃO COMPOSTA POR FOTOGRAFIA SOBREPOSTA POR RADARGRAMA OBTIDO COM ANTENA DE 400 MHZ, INTERPRETADA DAS LINHAS 1 E 2. DESTAQUE PARA AS SUPERFÍCIES LIMITANTES DE 1 ^A E 2 ^A ORDENS. NA PORÇÃO SUPERIOR ESQUERDA É APRESENTADA UMA VISTA GERAL DA ÁREA IMAGEADA COM A DIREÇÃO DE AQUISIÇÃO.	71
FIGURA 4-33 – ILUSTRAÇÃO DA INTERPRETAÇÃO DOS RADARGRAMAS E FOTOMOSAICO APRESENTADA NA FIGURA 4-32.	71
FIGURA 4-34 ILUSTRAÇÃO COMPOSTA POR FOTOGRAFIA SOBREPOSTA POR RADARGRAMA OBTIDO COM ANTENA DE 200 MHZ INTERPRETADOS, DAS LINHAS 1 E 2 DAS LINHAS 1 E 2. DESTAQUE PARA AS SUPERFÍCIES LIMITANTES DE 1 ^A E 2 ^A ORDENS. NA PORÇÃO SUPERIOR ESQUERDA É INDICADA A DIREÇÃO DA AQUISIÇÃO.	72
FIGURA 4-35 ILUSTRAÇÃO DA INTERPRETAÇÃO DOS RADARGRAMAS E FOTOMOSAICO APRESENTADA NA FIGURA 4-34.	72
FIGURA 4-36 ILUSTRAÇÃO COMPOSTA POR FOTOGRAFIA SOBREPOSTA POR RADARGRAMA OBTIDO COM ANTENA DE 100 MHZ, INTERPRETADOS, DAS LINHAS 1 E 2. DESTAQUE PARA AS SUPERFÍCIES LIMITANTES DE 1 ^A E 2 ^A ORDENS.	73

FIGURA 4-37 ILUSTRAÇÃO DA INTERPRETAÇÃO DOS RADARGRAMAS E FOTOMOSAICO APRESENTADA NA FIGURA 4-36.	73
FIGURA 4-38 SUPERFÍCIE DECIMADA DA NUVEM DE PONTOS.	74
FIGURA 4-39 LOCALIZAÇÃO DO PERFIL GPR EM RELAÇÃO À NUVEM DE PONTOS.	75
FIGURA 4-40 RADARGRAMA AGREGADO À SUPERFÍCIE DECIMADA.	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1 - VALORES TÍPICOS DE CONSTANTE DIELETRICA (K), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (σ), VELOCIDADE (v), E ATENUAÇÃO (A) DE ALGUNS MATERIAIS.....	22
TABELA 2-2 - VALORES DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO ENTRE MATERIAIS.	26
TABELA 2-3 VALORES MÉDIOS DA JANELA DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE E DE ALGUNS MATERIAIS.	30
TABELA 2-4 - MÁXIMO INTERVALO DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA CENTRAL DA ANTENA.	31
TABELA 4-1 - RESUMO DOS DADOS OBTIDOS NA CERTIFICAÇÃO DE BASTÕES.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMP	<i>Common Mind Point</i>
DOM	<i>Digital Outcrop Models</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
GEA	Grupo de Estudos de Análogos a Reservatórios Petrolíferos
GEORADAR	<i>Geological Radio Detection and Ranging</i>
GPC	<i>Ground Control Points</i>
GPR	<i>Ground Penetration Radar</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
LAE	Laboratório de Análises Estratigráficas
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MNS	Modelo Numérico de Superfície
MDS	Modelo Digital de Superfície
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i>
PVC	Poli Cloreto de Vinila
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfico
SFS	<i>Simple Features Specification</i>
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Capítulo I

Introdução

1 Introdução

Incertezas nos espaços interpoços de reservatórios petrolíferos correspondem à inexistência de dados e entendimento dos mesmos. As incertezas possuem relação estreita com a tomada de decisão do processo de desenvolvimento de campos de petróleo. Segundo Gringarten (2007), as incertezas não podem ser quantificadas, mas podem ser modeladas.

Uma forma de analogia para prever a performance e planejar o desenvolvimento de reservatórios petrolíferos é a representação geomatemática do mesmo, ou seja, construir um modelo. A modelagem de um reservatório petrolífero é uma representação, preferivelmente computacional, das propriedades físicas das rochas¹ e do fluido existente nas mesmas (Pringle *et al.*, 2006); (Bucley, 2006), associada à descrição da interação de muitos processos complexos descritos por suas propriedades que, por princípio, são determinísticos e mensuráveis. Esse fato torna um reservatório potencialmente mensurável (Keogh; Martinius; Osland, 2007).

Caracterização de reservatório é o processo para, quantitativamente, atribuir propriedades ao mesmo, reconhecendo informações geológicas e incertezas com variabilidade espacial (Keogh; Martinius; Osland, 2007). No entanto, os dados disponíveis são insuficientes (Wu; Xu; Zou, 2004) e incompletos frente à dimensão do modelo. São dados obtidos por poucas sondagens ou poços, alguns por correlação, de diversas fontes e escalas². Quando em quantidade suficiente, podem apresentar baixa precisão, como é o caso da sísmica. Assim, é preciso extrapolar suas distribuições e povoar o espaço correspondente às incertezas com dados que mantenham a natureza dos processos (Pringle *et al.*, 2006). A geoestatística e a modelagem estocástica dispõem dos métodos e ferramentas para integrar informações oriundas de diferentes origens³, espacialmente dispersas, e solucionar a carência de dados de forma consistente e coerente (condições de contorno e definidas pelo usuário) (Keogh; Martinius; Osland, 2007). Desse modo, é possível descrever modelos geoestatísticos que serão utilizados na simulação de reservatórios (Slatt *et al.*, 2000); (Keogh; Martinius; Osland, 2007) na estimativa de características e previsão de comportamento futuro (Rosa; Carvalho; Xavier, 2006).

¹ Porosidade, permeabilidade, saturação de fluido, etc.

² Escalas mega, macro, meso, e micro

³ Poços amostrados, perfis geofísicos, sísmica, análogos, etc

Os geocientistas, ao longo do tempo, têm fornecido modelos geológicos conceituais aos engenheiros de reservatório, para que estes desenvolvam seus trabalhos de simulação. Porém, nos últimos quinze anos, gradativamente, os geólogos estão sendo solicitados a prover base de dados e modelos mais elaborados, os quais respondam a questões mais quantitativas que qualitativas no que se refere à: capacidade do reservatório; performance; vida útil; técnica de perfuração recomendada; etc., como subsídio para planejamento de exploração e avaliação de custo mais precisos (Pringle *et al.*, 2006); (Slatt *et al.*, 2000). Enfim, o uso de dados geológicos reais para a elaboração de modelos de simulação mais realísticos.

Há muito tempo que estudos de afloramentos são utilizados para analogias com reservatórios petrolíferos, principalmente para fornecer, além de entendimento e interpretação, dados de geometrias deposicionais ou deformacionais em diferentes escalas de observação, dados esses utilizados pelos sistemas de simulação de reservatórios (Kenter & Harris, 2005); (Bucley, 2006). Um afloramento que tenha excelente exposição espacial, localização em área extensa o suficiente para permitir caracterização confiável das heterogeneidades, e, principalmente, similaridade geológica com o sistema petrolífero em estudo, é dito afloramento análogo (Pringle *et al.*, 2006).

Arquiteturas e estruturas geológicas são tridimensionais, são produtos de processos geológicos, adicionalmente com uma dimensão temporal (Jones *at al.*, 2006). Por várias décadas, os geólogos têm usado recursos uni e bidimensionais (mapas, seções transversais, levantamentos geológicos, fotomosaicos, estereogramas, diagramas de rosetas, blocos diagramas 3D) para compartilhar interpretações tridimensionais. Neste contexto, os modelos ditos tridimensionais são construídos a partir de dados de diferentes tipos, escalas, e origens, que consomem tempo, e no final são dados 2D que tentam mostrar, sem muito sucesso, o mundo tridimensional. Estes tipos de dados, quando reunidos no espaço tridimensional, serão pouco consistentes. Enfim, são representações bidimensionais assumindo consistência no espaço 3D. A integração desses dados é pessoal e depende da visão do pesquisador. Falta um arcabouço dentro do qual os demais dados de campo sejam integrados de forma coerente e precisa, com coordenadas do mundo real, e que possam ser inferido⁴. Esse arcabouço pode ser denominado de modelo digital de afloramento (*Digital Outcrop Model*) (Pringle *et al.*, 2004); (Bellian; Kerans; Jennette, 2005), é também um sistema de coordenadas do mundo real para

⁴ Estratigrafia, geometrias deposicionais e deformacionais, distribuição de fraturas, etc.

geometrias da arquitetura, consultas de superfícies de estratigrafia, distribuição de fraturas, e outros.

Dessa forma, é consenso que é limitado e impreciso extrair dados do estudo tradicional de afloramentos uma vez que tais dados são apenas qualitativos, não honram as geometrias deposicionais e deformacionais e não distribuem as propriedades petrofísicas segundo as fácies identificadas (Buckley, 2006). Mais grave ainda é o fato de que esses dados não geram modelos 3D, nem mesmo falso 3D, limitando as fontes de informações às superfícies bidimensionais dos afloramentos. Esse fato se torna mais relevante quando é necessário integrar esses dados com base de dados correlatas da engenharia do petróleo. Para se obter parâmetros geométricos precisos tais como sinuosidade do canal, conectividade e continuidade, são necessários modelos 3D mais realísticos. Trinks *et al.* (2005) argumentam que geólogos necessitam de ferramentas que capture a topografia 3D e as geometrias espaciais de forma digital, permitindo visualizações e inferências precisas em uma estação de trabalho, como se estivesse, no campo, frente a um afloramento real. Um modelo virtual 3D permite a integração de dados plani-altimétricos (GPS geodésico, Estação total, Laser scanner, etc.), dados geofísicos (Sísmica, GPR, etc.), e produtos de Sensoriamento remoto (imagens de satélite, fotografias de pequeno formato, etc.), permitindo visualização de geometrias complexas, validação de interpretações 2D contra o espaço 3D, como também permite confrontar o modelo com outros conjunto de dados.

A construção de representação computacional 3D de afloramentos tem evoluído aceleradamente nos últimos anos, principalmente com a adoção das tecnologias GEORADAR (*Geological Radio Detection and Ranging*) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*) que, respectivamente, imageam as geometrias interna e externa dos depósitos sedimentares. Tais tecnologias propiciam não só mais rapidez na descrição, como também maior fidelidade dos dados obtidos. Quando utilizados de forma integrada, o produto disponibilizado é um modelo estático digital tridimensional, o qual oferece informações sobre as geometrias deposicionais interna e externa dos depósitos sedimentares. É também possível a visualização deste produto em ambiente de realidade virtual imersivo.

A ferramenta GPR (*Ground Penetration Radar*) põe em prática a tecnologia GEORADAR. É um método não invasivo e não destrutivo, que permite a modelagem digital das estruturas internas do afloramento, gerando imagens que representam o tempo de ida e

volta de pulsos eletromagnéticos produzidos em uma antena emissora, refletidos nas descontinuidades elétricas em subsuperfície, e recebidos na antena receptora. O tempo de ida e volta do pulso pode ser convertido em profundidade.

O *Laser Scanner* é a implementação da tecnologia LIDAR. Trata-se de um sistema de varredura a *laser* que determina as coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, produzindo uma nuvem densa de pontos que cria um modelo 3D capaz de representar a superfície de um objeto (Bae & Lichti, 2007). O processo consiste em emitir contra a superfície milhares de pulsos *laser* por segundo, que, ao atingirem o objeto, são refletidos e captados pelo sensor, permitindo o cálculo das respectivas coordenadas (Nascimento Júnior *et al.*, 2006).

Um ambiente para abrigar um grande número de fontes de dados geológicos e geofísicos em um único modelo faz uso de uma combinação de métodos para aquisição digital de dados, integração de dados de fontes diversas, visualização 3D, e análise geoespacial (Jones *at al.*, 2006). O produto do *Laser Scanner* e do GPR é adequado como arcabouço para o primeiro método nesse momento. Dados, uni e bidimensional, de fontes diversas com tratamento adequado e específico, podem ser posicionados de forma precisa, permitindo compartilhar interpretações tridimensionais com integridade espacial. É o primeiro passo da construção de um banco de dados espacial georreferenciado, com visualização e manipulação 3D de afloramentos, análogos, ou não, a reservatório petrolífero. Dessa forma, não é uma aplicação SIG (Sistema de Informação Geográfico), já que é composto por objetos "*as build*", utilizando sensoriamento remoto, e não digitalizados a partir de peças gráficas. Esse trabalho também trata do segundo método (integração de dados de fontes diversas), com o adicional de prover os requisitos para o terceiro método (visualização 3D), disponibilizando alguns dados para o quarto método (análise geoespacial). A visualização 3D em geociências apresenta atualmente desenvolvimento significativo, Jones e outros (2006) categoriza e aborda diversos softwares com influência nessa área do conhecimento.

Os modelos estáticos tridimensionais, além de auxiliarem na tarefa de simulação de reservatórios, podem também ser utilizados como apoio em aulas expositivas, na formação ou aperfeiçoamento de novos profissionais.

Este trabalho apresenta uma metodologia para o primeiro passo, a produção de modelos estáticos digitais tridimensionais de depósitos análogos a reservatórios petrolíferos. Neste empreendimento será enfatizado o uso das tecnologias LIDAR e GEORADAR. Essa metodologia emprega métodos e técnicas de engenharia na busca de eliminar ou mitigar inadequações ou dificuldades pertinentes ao processo, otimizando recursos e reduzindo custos. A metodologia observa ainda os requisitos necessários para que o modelo estático virtual 3D de afloramento possa ser visualizado em ambiente de realidade virtual imersivo, e interativo.

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo é abordado o potencial dos modelos estáticos virtuais 3D no estudo de afloramentos análogos a reservatórios petrolíferos. Trata também dos objetivos propostos na realização desse estudo e justificativa para realização do mesmo. No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica abordando a fundamentação básica das tecnologias LIDAR e GEORADAR, necessária para a compreensão do desenvolvimento da pesquisa. O capítulo 3 apresenta um histórico de aplicação das tecnologias. No capítulo 4 é discutido os aspectos metodológicos, descrevendo a metodologia empregada, como também os equipamentos e *softwares* utilizados nessa pesquisa. O capítulo 5 discute os resultados obtidos durante a pesquisa. Finalmente, o capítulo 6 aborda as questões mais relevantes com relação aos métodos desenvolvidos, e sugere trabalhos futuros.

Este trabalho busca contribuir no processo de construção de modelos estáticos virtuais 3D de afloramentos, ao disponibilizar uma metodologia de produção consistente que aborda os diversos aspectos envolvidos, com controle de qualidade agregado. É também flexível por ser aplicável a diversos cenários. A metodologia mostrou-se adequada na obtenção de afloramentos análogos a reservatórios petrolíferos, permitindo obter, com acurácia, diversos parâmetros que representem geometrias espaciais, que serão utilizados como entrada de dados na simulação de reservatórios petrolíferos.

Capítulo II

Aspectos teóricos

2 Aspectos teóricos

A construção de representação computacional 3D de afloramento envolve diversas tecnologias, sendo LIDAR e GEORADAR as principais por tratarem, respectivamente, das estruturas interna e externas. A utilização eficiente dos equipamentos na fase de aquisição é determinante no processo construtivo do modelo 3D. Para isso é necessário o conhecimento da fundamentação teórica envolvida no processo. Este capítulo aborda o conhecimento necessário para a compreensão e uso eficiente das duas tecnologias, como também sua integração.

2.1 LIDAR - *Light Detection and Ranging*

O *Laser Scanner* é uma ferramenta para sensoriamento remoto que compõe a tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Essa tecnologia utiliza um sistema óptico-mecânico composto por: servo motores (direcionador); LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) de baixa energia e baixa divergência (emissor); e sensores sensíveis (receptor), para medir propriedades de um objeto distante.

2.1.1 Princípio de funcionamento

O processo de aquisição consiste em emitir um pulso de *laser* direcionado com o auxílio de um espelho de varredura comandado por servo motor. O pulso, ao atingir o objeto, tem parte da energia refletida para o equipamento que é captado pelo sensor (figura 2-1). São registrados, no mínimo, os parâmetros de altitude do laser, o tempo entre emissão e recepção, e a intensidade da energia refletida (Angelopoulou & Wright Jr, 1999) ; (Wutke & Centeno, 2007). Questões mais formais sobre os princípios de LASER pode ser encontrado em (Verdeyen, 1995)

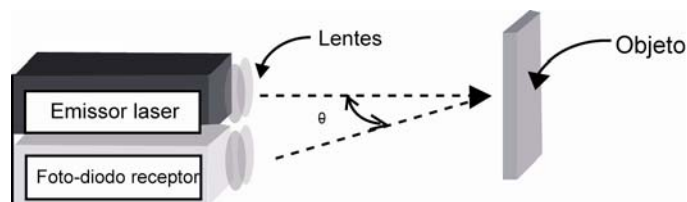


Figura 2-1 – Ilustração do princípio de tempo de percurso.
Fonte: (Angelopoulou & Wright Jr, 1999)

O processo de mensuração associa, a cada medição, uma coordenada dentro do sistema de coordenadas configurado no sistema *Laser Scanner*. O sistema de coordenadas pode ter o *Laser Scanner* como origem (figura 2-2), ou um sistema materializado na área de

aquisição, ou ainda, um sistema internacional como UTM (*Universal Transverse Mercator*) (Scaioni, 2005) ; (Mônico, 2000).

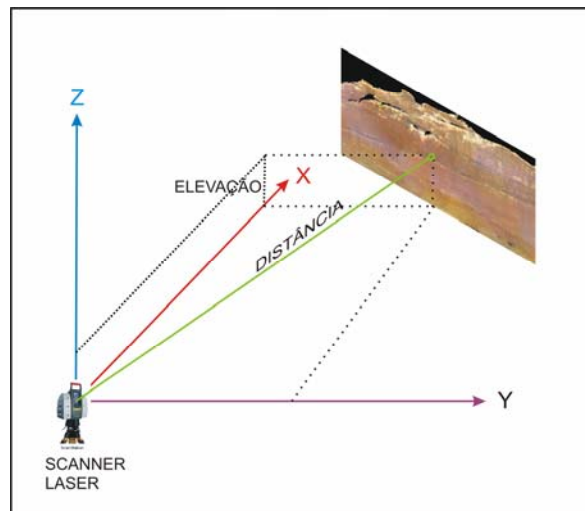


Figura 2-2 – Modelo funcional da tecnologia LIDAR

2.1.2 Nuvens de pontos

O processo automatizado de percorrer toda ou parte da superfície externa de um objeto realizando medições é denominado de varredura. O produto de uma varredura é uma nuvem de pontos, que por sua vez é o Modelo Numérico de Superfície (MNS) do objeto de estudo. A resolução (distância entre pontos) é função do projeto construtivo do equipamento, questões de fundamento podem ser encontradas em: (Boehler & Marbs, 2002; Wutke & Centeno, 2006; Wutke & Centeno, 2007).

A figura 2-3 é a nuvem de pontos correspondente a aquisição de uma frente de duna no município de Porto do Mangue, no estado do Rio Grande do Norte. A figura é um instantâneo obtido com o software de controle do equipamento *Laser Scanner*, com o observador posicionado na área anterior direita e acima da frente de duna. Nessa aquisição, o equipamento foi posicionado de forma frontal à frente da duna, com o eixo x na transversal (cor vermelha), o eixo y na longitudinal (cor verde), e o eixo z (cor azul), que corresponde à altimetria, conforme mostra o ícone do sistema de coordenadas na lateral esquerda superior da figura.

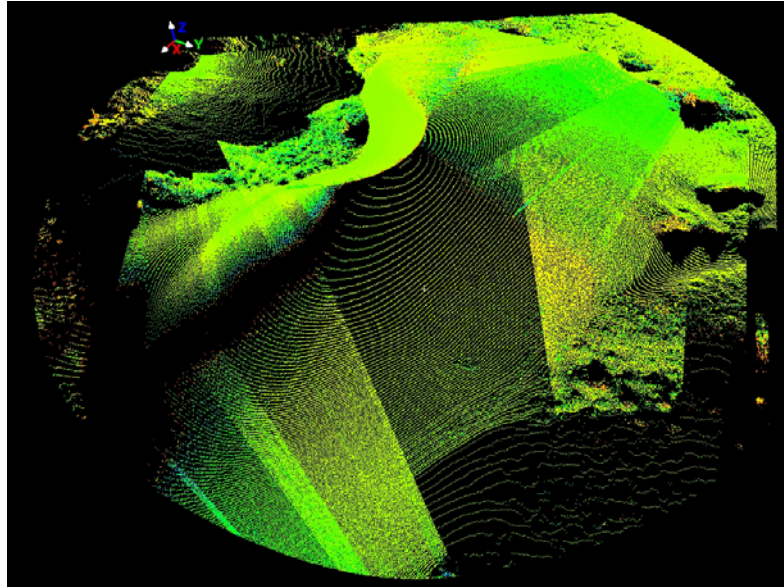


Figura 2-3 – Nuvem de pontos correspondente à aquisição de uma frente de duna no município Porto do Mangue - RN.

A Figura 2-4 mostra a mesma nuvem de pontos fruto do imageamento, neste caso, o observador está posicionado na lateral esquerda da frente de duna. Nesse ângulo é possível observar a nuvem a diversas distâncias, visualizando os pontos isolados próximo ao observador, e aparentando uma superfície quando distante.

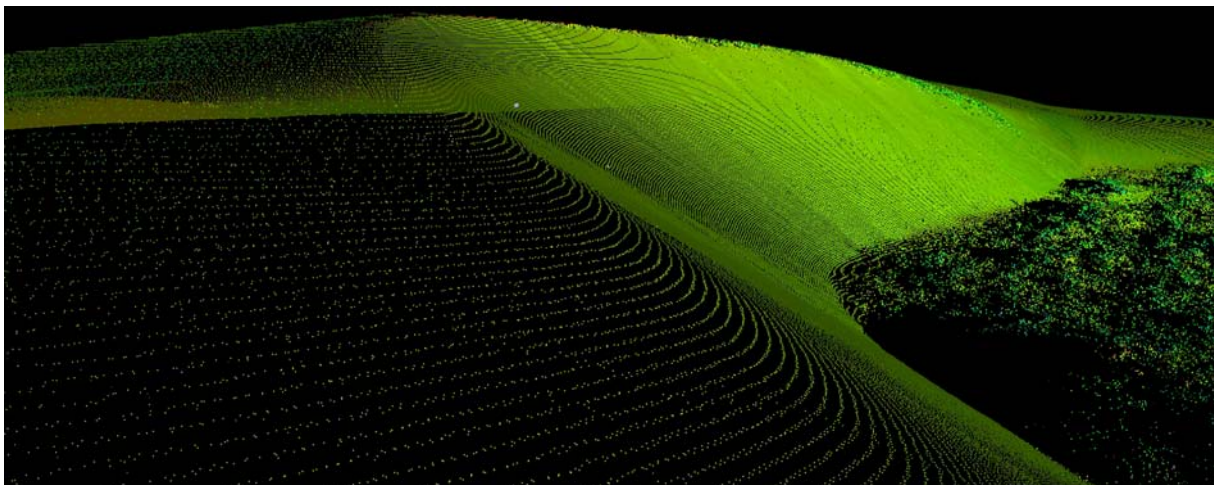


Figura 2-4 – Nuvem de pontos de uma frente de duna destacando os pontos individuais quando vistos próximos, e o aspecto de superfície quando visto à distância.

O termo “estação de coleta de dados”, ou simplesmente “estação”, corresponde ao local onde é posicionado o *Laser Scanner* para realizar todo ou parte de um trabalho. “Cena” é definida como a operação de varrer uma vez, todo, ou parte, do objeto de estudo, obtendo medidas individuais de pontos com coordenadas 3D (x, y, z) em uma estação.

Podem ser realizadas várias cenas em uma mesma estação porque o sistema de coordenadas é o mesmo, já que o *Laser Scanner* não foi movido. Então, o termo “imageamento” significa posicionar o *Laser Scanner* em uma estação com o objetivo de varrer toda ou parte da superfície do objeto e obter uma única nuvem densa de pontos, produto de uma ou mais cenas. A nuvem de pontos que modele tridimensionalmente o objeto de estudo é definida como “imageamento registrado”.

O *Laser Scanner* tem um campo de visão limitado (Bae & Lichti, 2007), por isso, na prática, em casos especiais, é pouco comum realizar o imageamento de um objeto em uma única estação, mesmo com mais de uma cena. A prática de campo é obter a representação 3D do objeto realizando cenas em várias estações diferentes. É comum se utilizar cenas com maior densidade de pontos em pequena área da área maior já levantada, para se obter maior detalhe. Um raio *laser*, para pequenas distâncias, possui uma trajetória retilínea. O imageamento de um objeto não plano terá grande probabilidade de gerar zonas com sombras, ou seja, o raio não alcança a superfície em segundo plano para a posição do equipamento (estação). Essas sombras são denominadas oclusões. A solução é imagear o objeto sob diversos ângulos, eliminando ou reduzindo-as satisfatoriamente.

2.1.3 Registro de nuvens de pontos

O produto final de um ou mais imageamentos é uma nuvem consolidada a partir das nuvens individuais. Cada nuvem individual possui seu sistema de coordenadas. A operação de consolidar todas as nuvens no mesmo sistema de coordenadas é denominada “registro de nuvens de pontos” (Bae & Lichti, 2007). Isto significa realizar operações matemáticas de roto-translação de eixo dos sistemas de coordenadas das nuvens de pontos para um mesmo sistema de referência (Scaioni, 2005). É a operação mais importante em todo o processo (Elkhrachy & Niemeier, 2006).

A figura 2-5 mostra duas nuvens individuais e a nuvem resultante da operação de registro. As nuvens foram obtidas de um imageamento na Serra das Confusões – PI.

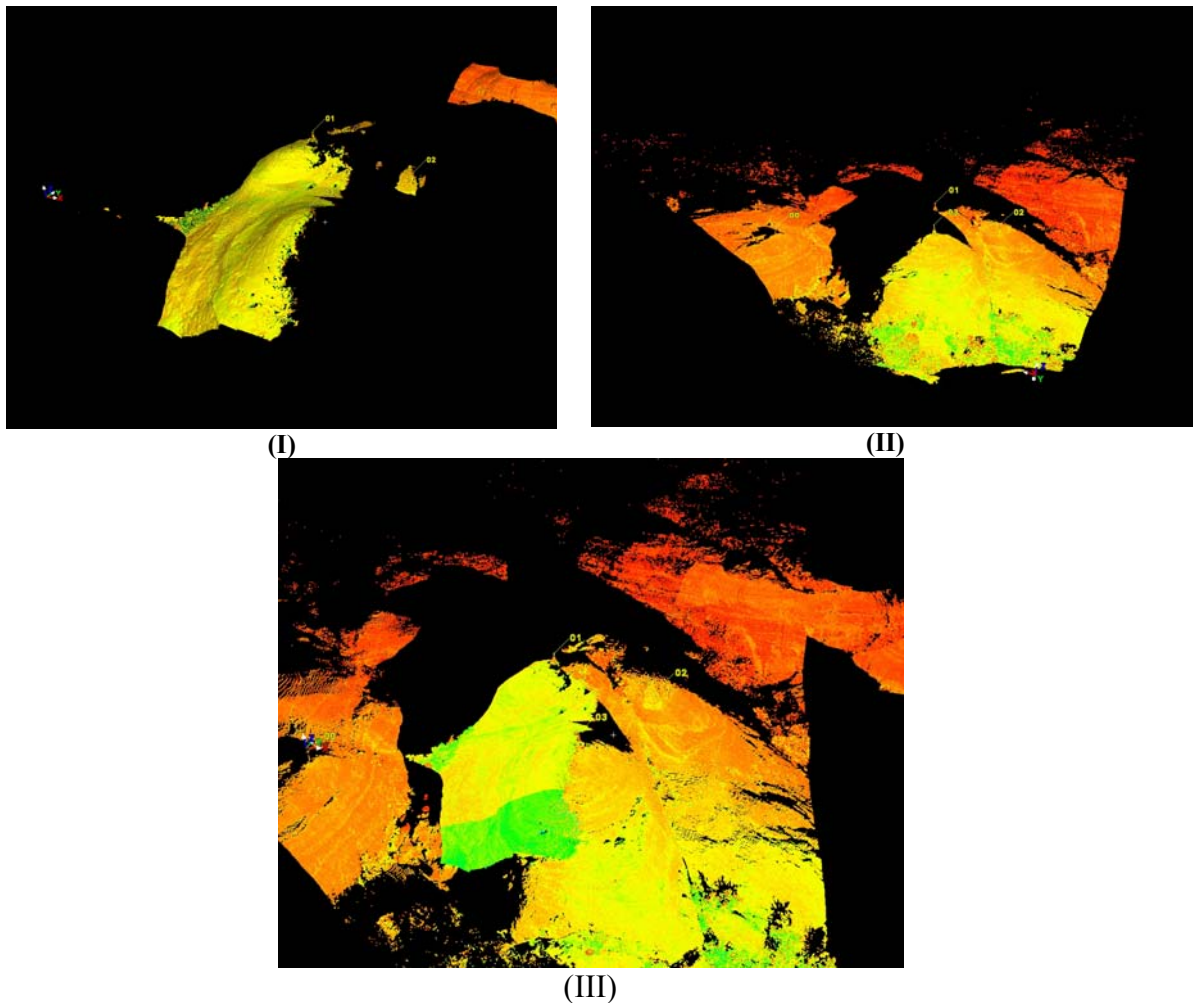


Figura 2-5 – Imagens de duas nuvens de pontos (I e II) e o registro de ambas (III), de um afloramento na Serra das Confusões - PI.

Target é um acessório comercializado pelo fabricante do equipamento (figura 2-6), (Schuhmacher, 2002) que é utilizado para materializar um ponto com coordenadas, com erro sub milimétrico, dentro da nuvem de pontos. O processo de determinar as coordenadas do centro do *target* é denominada de “adquirir *target*”.



Figura 2-6 – *Targets* do tipo circular com giro (esquerda), quadrado com giro (centro), e magnético (direita).

Fonte: LASER SCANNER CYRAX HDS 3000

Existem duas formas básicas de registrar nuvens de pontos denominadas de: Rede de Controle; e Nuvem-a-nuvem.

O princípio da Rede de Controle ou Estrutura de Controle consiste em materializar um conjunto de pontos com coordenadas conhecidas dentro de um sistema de referência arbitrário ou geodésico. Cada cena, individual e isoladamente, é registrada em relação à rede. As cenas estão “registradas” entre si apenas de forma relativa, e as nuvens passam a ser uma só porque estão no mesmo sistema de coordenadas. Quando a rede de controle é um sistema de coordenadas geodésico, o imageamento é georreferenciado. Nesse método, uma aquisição deficiente fica restrita à estação, e não é transferido para os demais imageamentos. De modo geral, guardando as especificidades das técnicas, desde que os nós da rede não sejam desmaterializados, além de devidamente aferidos e documentados os conjuntos utilizados (tripé, bastão, *targets*) com respectivas alturas, um imageamento pode ser realizado/refeito, a qualquer época, sem perda de acurácia da nuvem registrada. Este método dispensa qualquer área de sobreposição de imageamentos adjacentes. Essa forma de registro dispõe de três técnicas: registro direto; registro da estação; e registro de *targets*.

O método denominado “registro direto” é passível de utilização quando o sistema *Laser Scanner* permite configurar previamente suas coordenadas (x, y, z), dentro do sistema de coordenadas definido (geodésico ou arbitrário). Ou seja, o *software* que controla o equipamento faz a translação de eixo em tempo de varredura. Na técnica “registro da estação”, o *Laser Scanner* é locado, centrado, e nivelado nos nós da rede de controle, onde são realizados os imageamentos, e a translação de eixos não é realizada em tempo de execução. A habilidade de estacionar o *Laser Scanner* sobre ponto conhecido e medir a altura, é um processo grosseiro. Assim, é uma técnica utilizada apenas para trabalhos que exijam baixa acurácia. Na técnica “registro de *targets*”, estes são locados nos nós da rede e definidas as coordenadas dos seus centros. Durante o imageamento, cenas são realizadas para adquirir os mesmos *targets*. A acurácia da técnica está na aquisição dos *targets*.

Uma "Rede" pode ser materializada por piquetes ou marcos com suporte de outros equipamentos como GPS ou Estação Total. Dois métodos podem ser utilizados: Poligonal e Irradiação. No primeiro método, um polígono é gerado seqüencialmente, onde cada vértice representa uma estação de imageamento com o *Laser Scanner*. No segundo método, o polígono é gerado a partir de uma base fixa escolhida de forma que possa

posicionar, deste local, todos os vértices do polígono. O primeiro método é mais preciso por permitir avaliar o erro que, associado ao erro do *Laser Scanner*, define o erro total do sistema.

No princípio denominado “Nuvem-a-nuvem”, a diretriz básica é a existência de, pelo menos, três pontos bem conhecidos adquiridos em cada nuvem, que serão pontos de controle (GCP – *Ground Control Points*). Estes pontos devem formar um plano imaginário, inclinado em relação ao *Laser Scanner*. Melhor são quatro ou mais pontos formando um volume imaginário tendo o *Laser Scanner* próximo ao centro. Esses cuidados garantem uma melhor acurácia da nuvem registrada. As técnicas desse princípio registram as nuvens aos pares. Uma aquisição deficiente transmitirá aos demais registros essa imprecisão. Como normalmente não há materialização dos pontos de controle, não é possível posteriormente refazer um imageamento. Assim, a probabilidade é praticamente nula de estacionar o sistema de coordenadas do *Laser Scanner* no mesmo lugar no espaço, como também os pontos de controle. Essa forma de registro dispõe de três técnicas: *targets* como pontos de controle; feições como pontos de controle; sobreposição de nuvens.

A técnica denominada “*targets* como pontos de controle” consiste em dispor no mínimo três *targets* que sejam comuns as duas cenas. Os *targets* não necessariamente devem estar contidos na cena sobrepondo o objeto de estudo. A técnica permite realizar diversas cenas isoladas, estas pertencem ao mesmo imageamento, visto que o *Laser Scanner* não é deslocado. Consiste em técnica simples, de alta acurácia, mas que requer cuidado na definição da locação dos *targets*, como também pode exigir um grande número deles. Não é indicada para *sites* onde não seja possível posicionar *targets* com facilidade. Além disso, apresenta baixa produtividade. A técnica chamada “feições como pontos de controle” é uma variação da anterior. Diferentemente, em vez de *targets*, são definidos como pontos de controle feições do objeto (centros, vértices, cruzamentos, limites, etc.) para substituir o centro dos *targets*. Sobre as feições escolhidas também são realizadas cenas com alta densidade. A técnica apresenta as mesmas características da técnica anterior, mas com acurácia menor, sendo indicada para locais onde não é recomendada a colocação de *targets*, ou seja, há impossibilidade ou dificuldade no posicionamento dos mesmos. A técnica “sobreposição de nuvens” não utiliza qualquer feição ou *target*. Nela, as nuvens devem apresentar uma sobreposição acima de 15 % (Jacobs, 2005). Por questões de desempenho e otimização, o operador deve indicar três ou mais pontos ou regiões comuns pertencentes à sobreposição de nuvens como indicações iniciais. Pode apresentar alta acurácia, já que utiliza

centenas ou milhares de pontos no ajustamento (Jacobs, 2005), mas é completamente dependente da indicação correta dos pontos comuns nos dois imageamentos.

Target virtual (figura 2-7) não é uma técnica, e sim um recurso onde as coordenadas do ponto central do *target* não são obtidas pelo sistema *Laser Scanner*, mas informado pelo operador utilizando o *software* de registro, digitando os algarismos correspondentes, ou clicando com o mouse.

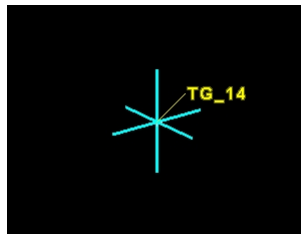


Figura 2-7 – Aspecto visual do recurso *target* virtual.

Cada técnica de registro exige um método de levantamento próprio. Então, existe uma íntima relação entre a definição do método de registro e do método de imageamento. A acurácia desejada, o *site*, e a disponibilidade de recurso de apoio (GPS, Estação Total, *targets*, etc) definem a técnica de registro e, conseqüentemente, o imageamento.

Tratamentos formais relacionados a registro de nuvens podem ser encontrados em: (Elkhrachy & Niemeier, 2006); (Bae & Lichti, 2007);

2.1.4 Georreferenciamento de nuvem de pontos

O processo de georreferenciamento é distinto do registro, ou seja, o registro consolida todos os imageamentos a um mesmo sistema de coordenadas, que pode ou não ser um sistema internacional. Para realizar essa tarefa é suficiente informar as coordenadas geográficas do equipamento antes do imageamento. Caso o registro seja por rede de pontos, esta deve ser georreferenciada. Se o método de registro for direto, o *Laser Scanner* deve ser georreferenciado antes da aquisição.

Tratamentos formais relacionados a georreferenciamento podem ser encontrados em: (Scaioni, 2005).

2.1.5 Reflectância

O *Laser Scanner*, além de obter valores precisos das coordenadas (x, y, e z) de cada ponto da nuvem de pontos, também avalia, de cada ponto adquirido, um atributo adicional, a reflectância (Angelopoulou & Wright Jr, 1999; Boehler & Marbs, 2003). Esta é a intensidade da energia de retorno do *laser*. Este atributo permite identificar diferentes feições do objeto estudado (figura 2-8).

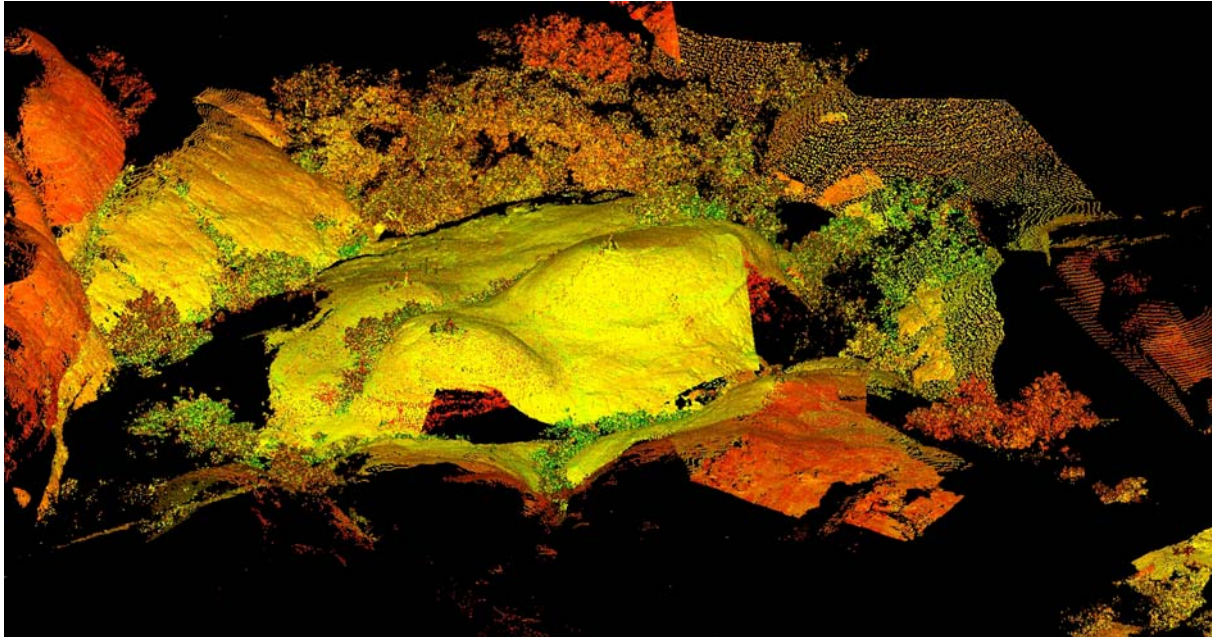


Figura 2-8 – Nuvem de pontos do afloramento na Serra das Confusões – PI, tendo a reflectância como textura.

Superfícies brancas refletem melhor, enquanto superfícies escuras refletem, relativamente, mais fraco. Superfícies coloridas dependem das características espectrais do *laser* (verde, vermelho, ou infravermelho próximo).

Há dois tipos de reflectância: especular e difusa. A primeira reflete a energia de volta em uma única direção, mas a direção depende da forma da superfície e pode não ser em direção do *Laser Scanner*. Ocorre em superfícies semelhantes a metal polido ou vidro. Na reflectância difusa, a energia é refletida em todas as direções possíveis. Ela é própria de materiais rugosos na escala do comprimento de onda do *laser* (Angelopoulou & Wright Jr, 1999). Muitos materiais combinam as duas reflexões simultaneamente.

Um estudo prático, não conclusivo, com dois experimentos abordando reflectância pode ser encontrado em (Gordon; Lichti; Stewart, 2001).

Não só a assinatura espectral do material da superfície do objeto pode comprometer o imageamento, mas também fatores ambientais como temperatura, partículas suspensas (fumaça, neve, chuva, garoa) e campos eletromagnéticos fortes. Comparado com o sinal, podem absorver, refratar, ou espalhar o *laser* (Angelopoulou & Wright Jr, 1999) alterado o tempo de retorno. Com a violação do princípio, a distância calculada se torna inválida. Há observações de erro na distância calculada pelo equipamento várias vezes maior que o desvio padrão do mesmo (Boehler & Marbs, 2003).

Na ocasião de imageamento, se faz necessário observar as condições do ambiente, e, eventualmente, considerar a frequência central do *laser* e as assinaturas espectrais dos materiais quando o equipamento apresentar algum comportamento não esperado.

2.2 GPR- Ground penetration radar

O método GPR é também conhecido como Radar de Penetração do Solo, ou GEORADAR. É um conjunto de equipamentos, métodos e técnicas não invasivo para detectar e identificar estruturas rasas em subsuperfície.

O sistema GPR (figura 2-9) baseia-se na geração de um pulso de energia eletromagnética com duração de nanosegundo (10^{-9} s) e frequência entre 10 MHz a 4 GHz. A energia é irradiada no solo, utilizando-se para isso uma antena transmissora. No seu deslocamento, a energia altera sua velocidade ao atingir materiais com propriedades elétricas diferentes. Alteração de velocidade abrupta caracteriza um refletor, ou seja, ocasiona a reflexão de parte da energia. A porção que retorna à superfície é captada por uma antena receptora e tratada por uma unidade de controle que grava o tempo duplo de viagem do pulso, medido em nanosegundo (figura 2-10). É gravada, ainda, a respectiva intensidade do sinal refletido. Além da reflexão, o pulso elétrico também sofre refração e difração.

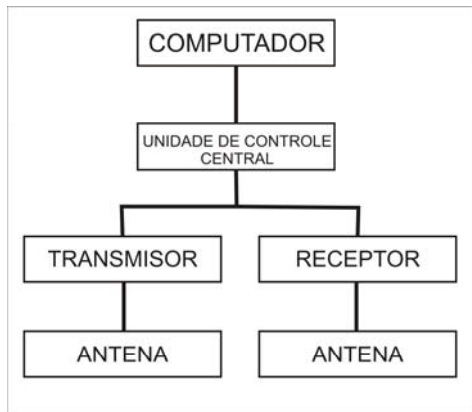


Figura 2-9 – Diagrama de bloco de um sistema GPR típico.

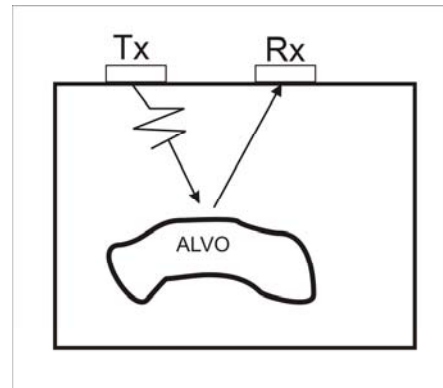


Figura 2-10 – Ilustração conceitual de um pulso emitido (Tx) pelo GPR e refletido (Rx) em subsuperfície.

Fonte: (Annan & Davis, 1997)

A emissão de um pulso é denominado de *Scan*. Imediatamente após a emissão do pulso, a unidade de controle inicia uma contagem de tempo (*time windows* ou *Range*), em nano segundos, durante o qual a unidade de controle amostra (*sample*) um número fixo de vezes a antena receptora e grava o valor digital correspondente à energia refletida, detectada. O tempo de abertura da "janela de tempo" deve ser suficiente para que o pulso atinja a profundidade desejada e retorne. A "janela" também define a profundidade máxima alcançada na aquisição.

Para o usuário, o registro das amostragens correspondente à energia refletida é denominado de traço, que pode ser representado sob duas formas: estilo osciloscópio (*O-scope*); e estilo linha (*linescan*), que pode ser observado na figura 2-11. No primeiro caso, as diversas amostragens são interpoladas para uma função que represente a amplitude do sinal retornado. No segundo caso, o valor da amostragem é codificado como um segmento de linha em tons de uma paleta de cores. Sucessivos *scans* são empilhados lado a lado (*stacked*) formando uma imagem contínua.

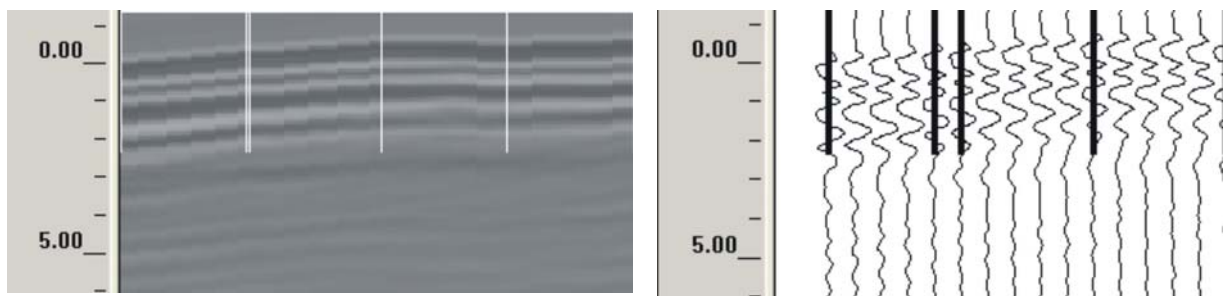


Figura 2-11 – Representações de uma aquisição GPR. Acima um conjunto de traços mostrados como *linescan* e, abaixo na forma de *O-scope*.

O registro de uma seqüência de amostragens (traços), convenientemente espaçadas, delinea uma seção do refletor. Os contornos obtidos com o processamento do registro das reflexões contêm informações precisas da forma e orientação das estruturas no plano do levantamento (figura 2-12).

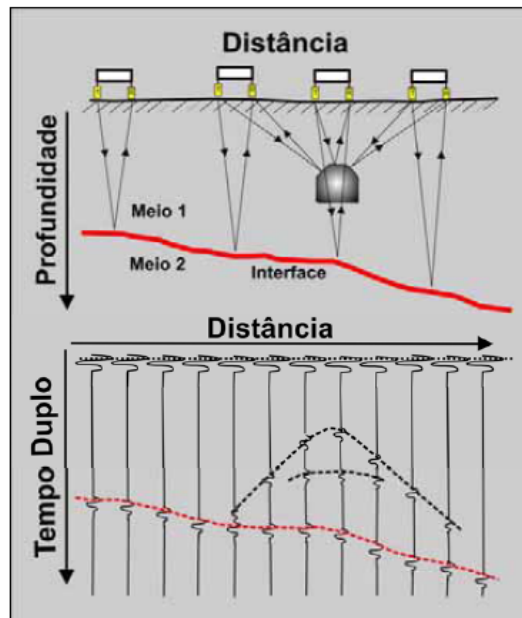


Figura 2-12 – Ilustração conceitual de uma aquisição com GPR.
 Fonte: (Xavier Neto & Medeiros, 2005)

O produto do levantamento de GPR é um Radargrama, representado no estilo *linescan* (figura 2-13).

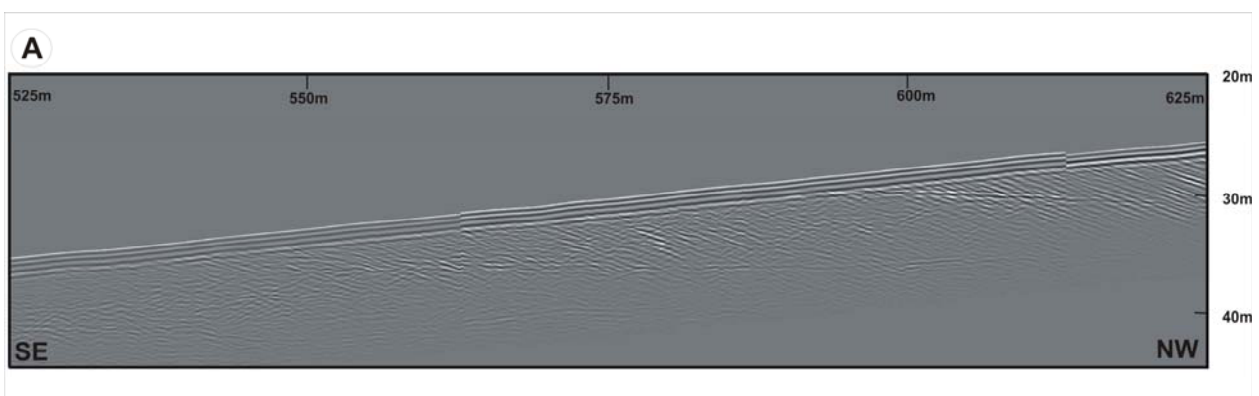


Figura 2-13 – Exemplo de radargrama em uma duna na Mina Millenium, Município de Mataraca - PB.

No radargrama, o eixo das abscissas representa a distância percorrida pelo sistema GPR ao longo da aquisição. No eixo das ordenadas o tempo duplo de propagação.

O uso de onda eletromagnética para investigar a subsuperfície não é novo. Um histórico de instrumentação e uso do GPR pode ser encontrado em Porsani (2001), Neal (2004), Annan (1997), e Annan (2002).

O usuário espera que o GPR possa detectar e identificar estruturas rasas em subsuperfície, obtendo profundidade, tamanho, forma, espessura, etc. Para isso, três aspectos são importantes:

- a penetração, que é a distância da fonte de emissão até onde as reflexões ainda são distinguíveis do ruído de fundo. Conseqüentemente, define a profundidade máxima de exploração;
- a velocidade de propagação, que permite quantificar a profundidade dos refletores;
- a resolução, que está relacionada diretamente com a distinção ou não de duas descontinuidades próximas.

Segundo Porsani (2001), a velocidade de propagação no meio e a profundidade de penetração são os dois fatores mais importantes na aplicação do GPR.

A fundamentação teórica do GPR está na física das ondas eletromagnéticas, sua aplicação e eficiência está diretamente relacionada com as características eletromagnéticas dos materiais. Annan (2001) observa que a forma como os campos elétrico e magnético interagem com o material, controla como estes trafegam pelo meio e são mais ou menos atenuados, o que impacta no desempenho do GPR.

Os sinais emitidos pelo GPR encontram materiais de diferentes propriedades eletromagnéticas e de diferentes escalas. Isso requer que o comprimento de onda e os objetos estejam em escalas comparáveis para que os mesmos sejam detectados.

Maxwell desenvolveu a teórica do eletromagnetismo descrevendo o comportamento de campos elétricos e magnético em qualquer meio (Verdeyen, 1995). Segundo Annan (2001), na escala macroscópica, os fenômenos decorrentes da interação entre campos elétricos e magnéticos para os materiais geológicos podem ser descritos pelas seguintes propriedades eletromagnéticas:

- Permissividade dielétrica Expressa a característica de um material em armazenar cargas elétricas;
- Condutividade elétrica Expressa a capacidade de um material em permitir a movimentação de cargas elétricas quando submetido a um campo elétrico; e
- Permeabilidade magnética Expressa a habilidade de um material em se polarizar quando submetido a um campo magnético.

Materiais geológicos submetidos a um campo eletromagnético externo têm suas cargas elétricas não livres⁵ deslocadas da sua posição de equilíbrio elétrico neutro para novas posições. Esse movimento gera uma corrente elétrica denominada Corrente de Deslocamento. A nova configuração de cargas provoca uma polarização com conseqüente transferência de energia do campo elétrico aplicado para o material. Cessada a influência do campo elétrico aplicado, as cargas elétricas se deslocam novamente para um novo estado de equilíbrio neutro, liberando parte da energia armazenada, o restante da energia é dissipada na forma de calor.

A polarização é diretamente proporcional ao campo elétrico aplicado, sendo a permissividade dielétrica (ϵ) a constante de proporcionalidade. Esse fenômeno possui analogia com o componente capacitor em circuitos eletrônicos, sendo, portanto, quantificada em unidades de capacitância (Farads) por metro (Neal, 2004). A permissividade dielétrica nunca é zero, e no vácuo tem o valor constante de 8.85×10^{-12} F/m. Na prática, se utiliza a constante dielétrica (K) em substituição à permissividade dielétrica já que é mais conveniente por ser adimensional. Matematicamente, a permissividade dielétrica é definida segundo a equação 2-1. (ϵ_r) é a permissividade dielétrica relativa ao vácuo (Annan, 2001).

$$K = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2-1)$$

O mesmo campo elétrico externo provoca uma diferença de potencial sobre as cargas elétricas livres, que adquirem movimento quase instantâneo até atingir uma velocidade constante, surgindo a corrente de condução. Após a retirada do campo elétrico, as cargas cessam seu movimento e mantêm a posição. A corrente de condução descreve o mecanismo de dissipação de energia, sob a forma de calor, de cargas elétricas livres submetidas um campo elétrico (Annan, 2001).

⁵ Restrita a uma limitada distância de movimento.

A corrente de condução é independente da frequência, e, pela Lei de Ohm, a densidade de corrente é linear e diretamente proporcional ao campo elétrico, sendo a condutividade elétrica a constante de proporcionalidade, expressa em Siemens por metro (S/m). Na prática, muitas vezes, é mais conveniente utilizar o submúltiplo miliSiemens por metro. Resistividade elétrica é definida como inverso da condutividade elétrica.

A permeabilidade magnética é independente da frequência e não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do espaço vazio para a maioria das aplicações geológicas na faixa do espectro utilizado pelo GPR. Portanto, raramente apresenta importância nas aplicações do GPR (Annan, 2001).

Uma discussão sobre os princípios básicos dos fenômenos associados à permissividade dielétrica, condutividade elétrica, e permeabilidade magnética podem ser encontradas em Annan (2001). A tabela 2-1 mostra valores das propriedades de alguns materiais.

TABELA 2-1 - VALORES TÍPICOS DE CONSTANTE DIELETRICA (K), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (σ), VELOCIDADE (v), E ATENUAÇÃO (a) DE ALGUNS MATERIAIS.

MATERIAL	K	σ (mS/M)	v (m/ns)	a (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^3	0,01	103
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia Saturada	20 - 30	0,1 - 1,0	0,06	0,03 - 0,3
Calcário	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Argila xistosa	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Silte	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Argila	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Sal seco	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Gelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

FONTE: TRADUZIDO DE (Annan, 2001)

Os materiais geológicos são, por natureza, heterogêneos, logo, quando submetidos a um campo eletromagnético, a corrente resultante é decorrente da interação das correntes de deslocamento e condução. Dependendo da frequência do campo, uma ou outra irá prevalecer, ou seja, com menor ou maior dissipação, influenciando mais ou menos na propagação da onda.

Segundo Porsani (2001), a profundidade de penetração é influenciada por quatro perdas por atenuação: corrente de condução; corrente de deslocamento; espalhamento geométrico; e dispersão. No espalhamento geométrico, há um decréscimo na amplitude do sinal ocasionado pela frente de onda⁶ que se desloca em forma de cone em expansão. Esse comportamento é independente do meio e a energia decresce com o quadrado da distância da fonte emissora (Porsani, 2001) ; (Neal, 2004).

As perdas por difusão que ocorrem na propagação são causadas pela heterogeneidade dos materiais, e são mais significativas nas altas frequências, ou quando o comprimento de onda se aproxima do tamanho das partículas (Porsani, 2001); (Neal, 2004). Segundo Annan (2001) heterogeneidades de pequena escala, embora gerem reflexões fracas e irreconhecíveis para o GPR, causam impactos quando os sinais passam por elas.

Em meios homogêneos, há uma frequência de transição, própria do material, abaixo da qual a perda de energia por corrente de condução é mais significativa que a perda por corrente de deslocamento. Isso ocorre porque o campo eletromagnético se propaga de forma difusa, devido às diferentes taxas de atenuação e velocidade de fase das componentes da frequência central. Acima dessa frequência, todos os componentes viajam na mesma velocidade e sofrem a mesma atenuação, ou seja, sem dispersão, conservando praticamente sua forma original. Já os materiais heterogêneos, têm mostrado que suas propriedades eletromagnéticas são dependentes da frequência (Annan, 2001).

Nos materiais geológicos, essa frequência de transição ocorre normalmente entre 10 e 300 MHz (Annan, 2001). Também, a perda por condução é praticamente independente da frequência. Já nas altas frequências, a propagação é limitada pelas perdas por difusão (Annan, 2001); (Neal, 2004).

⁶ Frente de onda são superfícies com igual tempo de deslocamento ou fase considerando a fonte de emissão.

Considerando ainda os materiais heterogêneos, as propriedades das ondas eletromagnéticas, quando os atravessam, tendem a apresentar um platô (figura 2-14) numa faixa de frequência própria. Neste intervalo, a velocidade de propagação e respectiva atenuação são independentes da frequência, e, conseqüentemente, os pulsos podem ser transmitidos com um mínimo de dispersão mesmo com atenuação significativa. Em alguns materiais, esse platô pode não existir, ou ser levemente inclinado. Os dois principais fatores para essa ocorrência é a presença de água, e/ou perda de energia por difusão (Annan, 2001).

O platô para materiais geológicos ocorre entre as frequências de 1 MHz e 1 GHz (GPR windows). É nessa faixa que o método GPR se torna viável. A atenuação varia exponencialmente com a distância, logo a profundidade de exploração é finita (Annan & Davis, 1997).

Conhecendo-se a velocidade, é possível estimar a profundidade do alvo. A velocidade de propagação em um meio é, matematicamente, expressa pela equação 2-2 (Neal, 2004).

$$v = \frac{C_0}{\sqrt{K}} \quad (2-2)$$

(V) é a velocidade de propagação, (C_0) a velocidade da luz do vácuo, e (K) a constante dielétrica do meio de propagação.

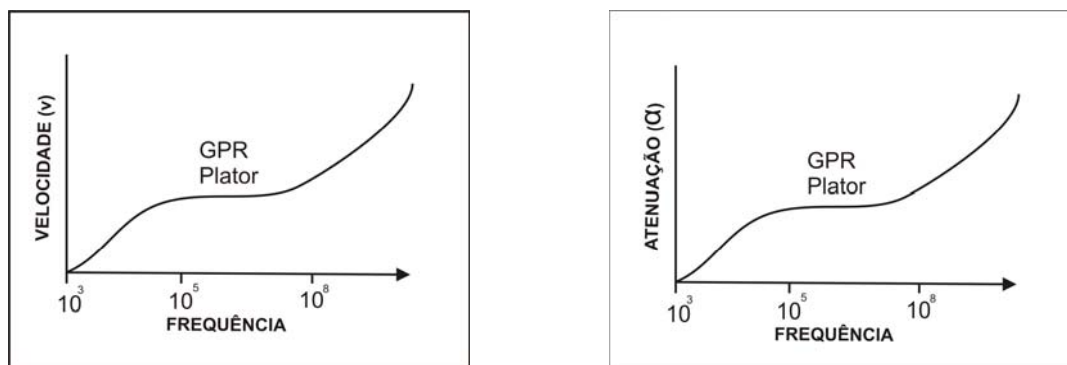


Figura 2-14 – Comportamento da velocidade e atenuação frente à frequência.
Fonte: (Anna & Davis, 1997)

O comprimento da onda (λ) penetrante é dado pela equação 2-3.

$$\lambda = \frac{c_0}{f\sqrt{K}} \quad (2-3)$$

(C_0) é a velocidade da luz do vácuo, (f) a frequência central da antena, e (K) a constante dielétrica.

A profundidade de penetração do sinal do radar é controlada pela taxa de atenuação do material, matematicamente expressa pela equação 2-4 (Davis & Annan, 1989):

$$\alpha = 1,636 \frac{\tau_0}{\sqrt{K}} \quad (2-4)$$

(α) é a taxa de atenuação expressa em dB/m, (τ_0) a condutividade elétrica, e (K) a constante dielétrica. Observa-se que a condutividade tem forte influência sobre a taxa de atenuação.

Adicionalmente, a amplitude (A) numa profundidade (z) qualquer é expressa pela equação 2-5. (A_0) é a amplitude inicial.

$$A = A_0 e^{\alpha z} \quad (2-5)$$

Reflexões ocorrem quando há diferença significativa nas características elétricas de dois meios de propagação em contato. Matematicamente, o coeficiente de reflexão (R) é expresso pela equação 2-6 (Porsani, 2001); (Neal, 2004). (K) é a constante dielétrica dos meios de propagação 1 e 2.

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}} \quad (2-6)$$

A tabela 2-2 mostra alguns valores do coeficiente de reflexão entre materiais, inclusive geológicos, com maior ocorrência. Outras interfaces e respectivos valores podem ser encontrados em Annan (2001).

TABELA 2-2 - VALORES DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO ENTRE MATERIAIS.

Interface	K1	K2	Z1	Z2	R
Ar - solo seco	1	4	377	188	- 0,05
Ar - solo molhado	1	25	377	75	- 0,67
Solo seco - solo molhado	4	25	188	75	- 0,43
Solo seco - rocha	4	6	188	154	- 0,01
Solo molhado - rocha	25	6	75	154	+ 0,34
Gelo - água	3.2	81	210	42	- 0,67
Solo úmido - água	9	81	126	42	- 0,5
Solo úmido - ar	9	1	126	377	+0,5
Solo - Metal	9	∞	126	0	-1

FONTE: ADAPTADO DE (Annan, 2001)

Em uma aquisição GPR, alteração gradual de constante dielétrica do solo não caracteriza um refletor. Deve ser observado ainda que a energia remanescente de uma reflexão, mesmo com amplitude menor, ainda pode refletir em interfaces subseqüentes. Casos especiais, como também um detalhamento matemático mais profundo, podem ser encontrados em Neal (2004) e Annan (2001).

Para o usuário, resolução é precisamente o quanto a profundidade e a geometria⁷ do alvo podem ser extraídas. Mais precisamente, a resolução do GPR é a capacidade do conjunto em distinguir dois sinais (pulsos) muito próximos ao mesmo tempo. Esses pulsos podem fazer diversos percursos da antena emissora até atingir a antena receptora, podendo chegar, simultaneamente, sobrepostos, ou separados no tempo (Annan, 2001).

São dois os componentes da resolução: longitudinal (profundidade); e lateral (figura 2-15).

⁷ Tamanho, forma, espessura, etc.

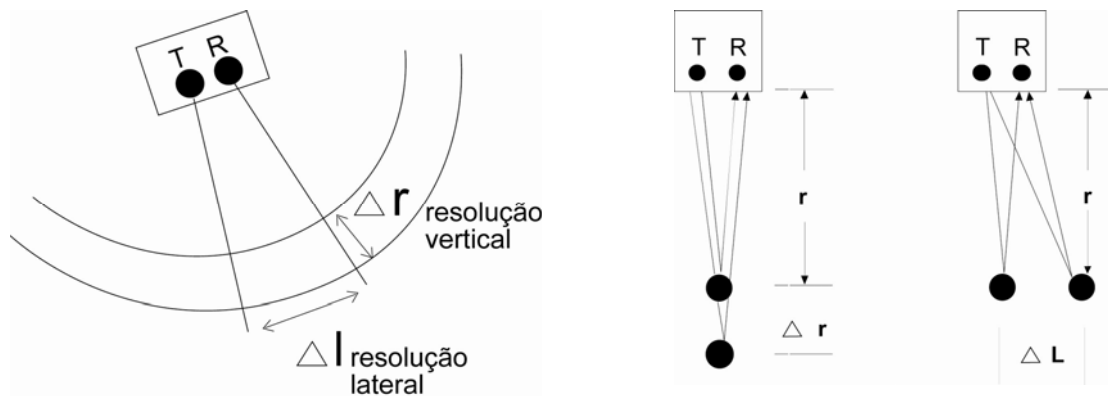


Figura 2-15 – Modelo para as resoluções vertical e lateral em GPR.
Fonte: (Annan, 2001)

Annan (2001) desenvolveu um modelo esquematizado na figura 2-15, no qual conclui que a resolução⁸ vertical, ou radial, pode se expressa pela equação 2-7.

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (2-7)$$

(W) é a largura e (v) a velocidade de propagação do pulso. Teoricamente, a resolução vertical é independente da distância à fonte geradora, conforme mostra a equação 2-7.

Igualmente, Annan (2001) concluiu que o deslocamento lateral obedece à equação 2-8. (d) é a distância à fonte geradora e (λ) o comprimento de onda da frequência central.

$$\Delta L = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (2-8)$$

O GPR é um sensor remoto ativo que detecta objetos que reflitam a energia emitida por ele, reflexões estas cujas magnitudes e identidades possuem estreita relação com as discontinuidades elétricas existentes entre o objeto e o material encaixante. A geometria do objeto também influi na qualidade do sinal retornado. Diversos fenômenos interferem nesse processo, podendo chegar a inviabilizá-lo. Um estudo bem detalhado pode ser encontrado em (Annan, 2001).

Existem dois métodos para avaliar, inicialmente, se a aquisição se apresenta como viável. São eles: equação de alcance do radar; e técnica de simulação numérica (Annan, 2001). O primeiro método é baseado no balanço energético entre a potência emitida pelo

⁸ Capacidade de distinguir dois eventos próximos, no caso dois refletores.

sistema GPR e os mecanismos de perda em diversos pontos importantes do trajeto da energia eletromagnética, desde a antena transmissora até a antena receptora. É um método de automação e uso simples, de baixo custo, mas exige informações iniciais nem sempre disponíveis. Não é um estudo conclusivo, mas é um guia satisfatório. O segundo método são aplicações de computador, comerciais ou não, voltadas para prever respostas do GPR. Como exemplo, o *software* "Electromagnetic Simulator for Ground Probing Radar". São dois programas ("GprMax2D V 2.0" e "GprMax3D V 2.0"), de código aberto, para diversos sistemas operacionais, desenvolvidos e mantidos pelo Dr. Antonis Giannopoulos da Universidade de Edinburgh (<http://www.gprmax.org/Home/>).

Independente se a aquisição visa um alvo específico ou exploração, avaliar a profundidade máxima teórica é recomendável. (Sensor & Software, 1999) sugere acolher o cálculo obtido durante a aplicação do método da equação de alcance do radar ou da técnica de simulação numérica. Recomenda, opcionalmente, uma regra prática, dada pela equação 2-9, mas sugere que deva ser considerado como limite máximo apenas 50% do valor obtido. A regra é válida somente para $0,1 \leq \alpha \leq 1$.

$$D_{Max} < \frac{35}{\sigma} \text{ ou } D_{Max} < \frac{35}{\sigma} \quad (2-9)$$

Onde (α) é a atenuação expressa em dB/m, (D) é a profundidade teórica em metros e (σ) é a condutividade elétrica expressa em mS/m. Essa regra prática parte do pressuposto de que o equipamento utilizado apresenta uma perda máxima por corrente de condução de no máximo 60 dB.

Também é preciso avaliar se o alvo e o meio encaixante possuem descontinuidade nas propriedades elétricas suficiente para distinguir o alvo das demais feições (corpos) sem interesse (ruído de fundo). Para isso, pode-se aplicar a equação prática 2-10, onde a reflectividade (P_r) deve ser maior que 0.01. Essa verificação não é útil quando a aquisição é de exploração, já que a constante dielétrica (K) do objeto não é conhecida.

$$P_r = \left[\frac{\sqrt{K_{Meio}} - \sqrt{K_{Objeto}}}{\sqrt{K_{Meio}} + \sqrt{K_{Objeto}}} \right]^2 \quad (2-10)$$

No balanço energético, deve ser consideradas, ainda, as condições externas, fora do controle da equipe de aquisição, que possam interferir no funcionamento do GPR, tais como, linhas de transmissão de energia elétrica, transmissor de rádio/celular, veículos, etc.

Em alguns casos, se faz necessário avaliar se as dimensões do objeto possuem escala compatível com o comprimento de onda e possam ser resolvidas. Sensor & Software (1999) sugere uma regra prática onde a razão entre a menor dimensão e a profundidade seja de 10:1.

2.2.1 Parâmetros de aquisição

2.2.1.1 Frequência de operação

A definição da frequência é um balanço entre três fatores que impõe restrições à mesma: resolução espacial desejada; profundidade de exploração; e limitação do ruído de fundo (*clutter*). No caso de conflito, deve ser optado pela profundidade.

Para a restrição "resolução espacial" (ΔZ), Annan (2001) recomenda que a frequência central (f_c^R) para uma taxa de largura de banda unitária em MHz deve satisfazer à equação 2-11. (K) é a constante dielétrica do alvo.

$$f_c^R > \frac{75}{\Delta Z \sqrt{K}} \quad (2-11)$$

Para a restrição "profundidade de exploração" (D), Annan (2001) recomenda que a frequência central (f_c^D), em MHz, deve satisfazer a equação 2-12. Embora não contemple todos os aspectos teóricos, mas é suficiente. (K) é a constante dielétrica do alvo.

$$f_c^D < \frac{1200\sqrt{K-1}}{D} \quad (2-12)$$

Para a restrição "limitação do ruído de fundo", Annan (2001) recomenda que a frequência central (f_c^C) em MHz, deve satisfazer a equação 2-13. (K) é a constante dielétrica do alvo.

$$f_c^C > \frac{30}{\Delta L \sqrt{K}} \quad (2-13)$$

f_c é a frequência definida, esta deve satisfazer à relação 2-14:

$$f_c^R < f_c < \min(f_c^D, f_c^C) \quad (2-14)$$

Se a relação 2.14 não for satisfeita, há uma incompatibilidade entre a profundidade e a limitação do ruído de fundo.

2.2.1.2 Janela temporal de amostragem

A janela de amostragem, ou *Range*, é o tempo a partir da emissão do pulso que a unidade de controle amostra a antena de recepção com o objetivo de medir a energia refletida. Para estimar a janela temporal (W), em nanosegundos, Annan (2001) recomenda a equação 2-15.

$$W = 1,3 \frac{2D}{V} \quad (2-15)$$

(D) é a profundidade desejada e (v) a velocidade no meio encaixante. Como guia prático para consulta, pode ser utilizada a tabela (2-3). Na falta de valores mais precisos, a mesma tabela sugere algumas referências que podem ser utilizados em aquisições por GPR.

TABELA 2-3 VALORES MÉDIOS DA JANELA DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE E DE ALGUNS MATERIAIS.

Profundidade (m)	Rocha	Solo molhado	Solo seco
0.5	12	24	10
1	25	50	20
2	50	100	40
5	120	250	100
10	250	500	200
20	500	1000	400
50	1250	2500	1000
100	2500	5000	2000

FONTE: (Annan, 2001)

Valores em nanosegundos

2.2.1.3 Intervalo temporal de amostragem

Esse parâmetro corresponde ao intervalo de tempo (t), em nanosegundos, entre duas amostragens seguidas, que a unidade de controle realiza sobre a antena de recepção com o

objetivo de medir a energia refletida. Annan (2001) desenvolve uma análise e propõe a equação 2-16 e a tabela 2-4. (f_c) é frequência central da antena expressa em MHz.

$$t = \frac{1000}{6f_c} \quad (2-16)$$

TABELA 2-4 - MÁXIMO INTERVALO DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA CENTRAL DA ANTENA.

Frequência central da antena (MHz)	Limite superior do intervalo de amostragem (ns)
10	16.70
20	8.30
50	3.30
100	1.67
200	0.83
500	0.33
1000	0.17

FONTE: (Annan, 2001)

2.2.1.4 Espaçamento entre estações

Corresponde ao espaçamento (Δx), expresso em metros, entre duas posições seguidas de emissão do pulso. Annan (2001) sugere a equação 2-17. f é a frequência central da antena e (K) é a constante dielétrica do meio encaixante.

$$\Delta x = \frac{75}{f\sqrt{K}} \quad (2-17)$$

2.2.1.5 Separação das antenas

Corresponde à distância (S) entre as antenas de emissão e recepção quando a aquisição é no modo bi estático. Annan (2001) sugere o uso da equação 2-18. (D) é a profundidade máxima estimada e (ϵ_r) é a constante dielétrica do meio encaixante.

$$S = \frac{2D}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (2-18)$$

2.2.2 Processamento dos dados

É uma atividade realizada em laboratório tendo como base os dados brutos obtidos em campo. É um processo iterativo, que visa retirar ou suavizar os ruídos de fundo, valorizando os refletores de interesse. Possui uma base sólida de recursos e ferramentas, muito delas originária da sísmica. A qualidade do produto final do processamento de dados de GPR é é fortemente dependente da experiência do operador.

Fisher et al. (1992) propõe um fluxograma de processamento tendo por base o conhecimento desenvolvido na sísmica. Já Sensors & Software (1999) propõe fluxo mais atualizado, resumido na figura 2-16.

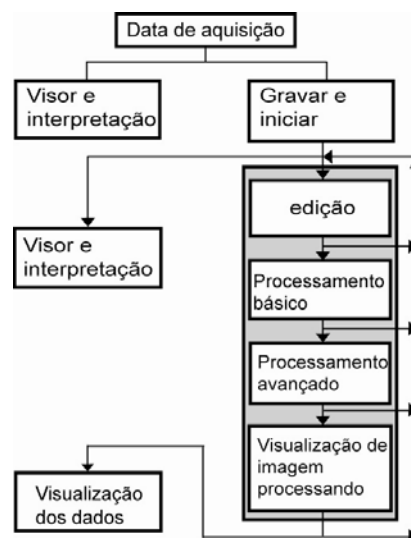


Figura 2-16 – Fluxograma para o processamento de dados GPR.
Fonte: (Annan, 2001)

2.2.2.1 Edição de dados

A primeira etapa no processamento é a edição de dados. Nessa fase são realizadas muitas atividades de documentação, conferência, e preparação de dados brutos que visam facilitar as etapas seguintes. Praticamente nenhuma alteração é realizada sobre os dados coletados.

2.2.2.2 Processamento básico

No processamento básico, são realizadas tarefas genéricas e comuns, que visam permitir uma interpretação inicial. São elas (Annan, 2001):

- DeWOW - filtro temporal, que visa remover os componentes resultantes do acoplamento (fenômenos indutivos) entre o pulso emitido e as reflexões de frequência muito baixa (efeito WOW);
- Remoção da média entre traços (*subtracting average*) - filtro com o objetivo de atenuar ruídos provocados pela indução eletromagnética existente entre as antenas,

que se sobrepõe aos sinais nas camadas mais rasas. É também utilizado para remover múltiplas, quando ocorrem horizontalizadas;

- Ganho - é uma função não linear, que equaliza a amplitude do sinal para recuperar a legibilidade do radargrama a medida que a profundidade aumenta; e
- Filtragem temporal e espacial - são os demais filtros, lineares ou não, passa-banda, transformada de Fourier, etc. Melhorar o aspecto básico dos dados, melhorando a visão, possibilitando uma melhor interpretação em subsuperfície.

Filtros são operações matemáticas realizadas sobre os dados. Se utilizadas indiscriminadamente podem distorcer completamente os dados coletados, criando, inclusive, artefatos nas áreas onde não há resposta em subsuperfície.

2.2.2.3 Processamento avançado

Os objetivos são os mesmos do processamento básico, mas resulta em dados significativamente diferentes dos iniciais. Inclui processos bem conhecidos da sismica e do GPR. Possibilita ainda obter informações quantitativas como velocidade e atenuação em contra ponto a profundidade. Também possui a capacidade de criar artefatos, exigindo um pesquisador experiente para sua aplicação.

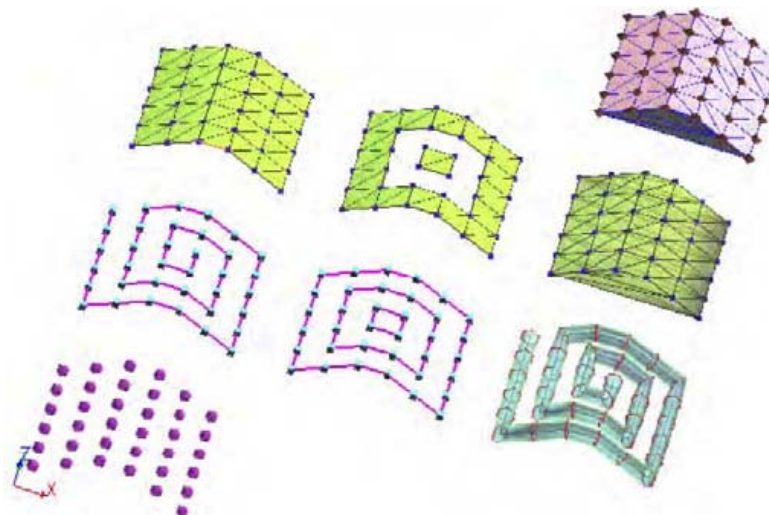
2.3 Modelagem estática 3D

Modelagem de reservatório e previsão de desempenho envolve a integração de diversas fontes de dados em um único modelo. São dados classificados em diversos grupos, sendo os mais significativos: interpretações geológicas; medida de testemunho de sondagens; aquisições de sismica 3D; e dados dinâmicos do reservatório. A prática atual compartimenta a modelagem em dois momentos, inicialmente uma modelagem estática com as três primeiras fontes. No segundo momento, os dados dinâmicos são agregados ao modelo estático utilizando simulação de fluxo (Tureyen; Karacali; Caers, 2004).

A Modelagem geológica (estática) é um conjunto de métodos matemáticos e computacionais permitindo reunir em um mesmo arcabouço: topologia; geometria; propriedades; e atributos de objetos geológicos de forma unificada, íntegra, e coerente. Um modelo de dados geológico integrado deve incluir dados oriundos de observações e um ou mais geomodelos. Este último é uma representação abstrata de situação geológica no espaço 3D, construída pela observação e interpolação de dados observados em pontos conhecidos. Num geomodelo a topologia e a geometria do volume geológico modelada são armazenadas no submodelo estrutural, enquanto as propriedades dos materiais constituintes estão associadas ao submodelo de propriedades físicas. Duas abordagens são utilizadas na definição

de geomodelos: modelos baseados em geobjetos; e modelos baseados em *grid* (Apel, 2005). Em ambos os casos, o volume geológico de interesse é subdividido em unidades elementares mutuamente exclusivas orientadas por um parâmetro de estudo. Um geomodelo é um repositório de geobjetos. O armazenamento e manipulação de geobjetos em computador utilizam modelos de dados discretos, ou seja, de pequenas unidades, que representam porções de superfície ou volume. Este modelo é adequado por permitir armazenar informações topológicas, geométricas, restrições, e propriedades dos materiais.

Na modelagem tridimensional (representação gráfica do todo ou parte de um geomodelo), o objeto primitivo é o ponto. Este possui atributos, dentre eles a posição em um sistema de coordenadas (X, Y, Z). O modelo de dados mais simples de objeto é um conjunto de pontos (*PointSet*), que herda os atributos do objeto primitivo ponto. Curva é um objeto constituído de nós (pontos) que são interligados por segmentos de reta. Cada nó tem um (extremidade) ou dois vizinhos (intermediário). Superfície triangular é um objeto formado por um conjunto de nós organizados como triângulos coplanares interconectados. O objeto superfície é composto por um conjunto isolado de faces. O objeto sólido é formado por um conjunto finito de superfícies formando um modelo fechado. Objetos complexos têm armazenado nos pontos seus atributos (figura 2-17).



**Figura 2-17 – Ilustração de objetos simples utilizados na modelagem 3D. Conjunto de pontos, curvas, superfícies, e sólidos.
Fonte: (Apel, 2005).**

Capítulo III

Estado da arte

3 Estado da Arte

A modelagem de reservatório faz uso da modelagem 3D na sua etapa estática. O submodelo estrutural é o arcabouço sobre o qual as demais aquisições são ancoradas. A tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que modela a superfície externa, juntamente com a tecnologia GEORADAR (*Geological Radio Detection and Ranging*), que modela a subsuperfície, são as tecnologias atualmente utilizadas para construir esse arcabouço integro e coerente. No entanto, essas duas tecnologias não foram desenvolvidas para esse fim. Uma terceira tecnologia é necessária para a integração, nesse trabalho o ambiente de modelagem e simulação GOCAD foi utilizado para esse fim. As tecnologias LIDAR e GEORADAR foram propostas e desenvolvidas em momentos diferentes, possuem históricos próprios e aplicação em áreas diferentes. Não é objetivo deste trabalho apresentar as diversas utilizações dos equipamentos, mas apresentar a evolução dessas tecnologias, e seus usos no âmbito da geomodelagem.

As aquisições da tecnologia LIDAR são realizadas com o equipamento *Laser Scanner*, equipamento que utiliza um sistema óptico-mecânico a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para medir propriedades de um objeto distante, em especial, gerar seu modelos digital de superfície (MDS). Com esses mesmos objetivos, Bellian; Kerans; Jennette (2005) propõe metodologia para mapeamento estratigráfico de afloramentos, que associado a outros dados permitindo caracterização de fácies com alta precisão, e conseqüente produção de modelo geológico digital 3D (DOM - *Digital Outcrop Models*). Jones e outros (2006) expandem os estudos anteriores ao nível regional. A metodologia propõe ainda a convergência de diferentes tipos de geomodelagem, SIG (Sistema de Informação Geográfico), e software de visualização. É objetivo ainda fazer de modelos geológicos multi-escala uma realidade prática. Todo o processo é ilustrado com dois estudos de caso.

Trinks *et al.* (2005) discutem uma metodologia para criação e análise de afloramentos virtuais. É também descrito a produção de visualização utilizando o conceito de objetos 3D fotorealísticos.

Laser Scanner permite aquisição de pontos com grande velocidade, alta acurácia, produtividade, resolução e eficiência. No entanto, possui a dificuldade de identificação de característica geológica na nuvem de pontos, mesmo utilizando a reflectância como coloração

dos pontos. Igualmente isto ocorre quando o ponto assume a cor do pixel da fotografia obtida com o equipamento. Um adensamento elevado de pontos para sanar essa limitação é oneroso pelo número de horas de aquisição e os problemas decorrentes. Buckley (2006) propõe a fotogrametria associado a métodos geoestatísticos como forma de solucionar a dificuldade.

Alba (2005), através de uma metodologia, propõe o uso do *Laser Scanner* na área de engenharia geológica. É proposta uma aquisição geométrica visando a produção de modelo digital de superfície de face de rochas com o objetivo de mapear áreas com instabilidade de maciço.

O GPR é um método geofísico amplamente utilizado para investigações não destrutivas em meios geológicos e estruturas rasas, sendo muito utilizado no estudo de análogos a reservatórios. Bristow e Jol (2003) apresentam recomendações práticas no uso do GPR em sedimentos. Beres e outros (2004) desenvolvem estudo em duas e três dimensões sobre arquitetura fluvioglacial utilizando GPR. Castro, Carvalho, e Castelo Branco (2006) aplicam o GPR no estudo da estruturação interna de depósitos de eolianitos na região costeira de Uruoca no estado do Ceará. Mcmechan, Gaynor e Szerbiak (2006) realizam modelagem 3D em clastos utilizando GPR. Estes são apenas alguns trabalhos com GPR em sedimentos, a literatura é extensa.

O GPR é utilizado não só em sedimentos, mas também em outras formações. Zeng e outros (2003) apresentam um estudo utilizando GPR em arenito, estudo semelhante e detalhado também pode ser encontrado em Corbeanu e outros (2001). Pringle e outros (2006) desenvolvem um estudo de GPR numa formação carbonífera.

No âmbito do grupo de pesquisa GEA (Grupo de Estudos de Análogos a Reservatórios Petrolíferos) do laboratório LAE (Laboratório de Análises Estratigráficas) da UFRN na produção de afloramentos digitais, diversos trabalhos foram produzidos: Menezes (2004), Freire e outros (2004), Freire (2004), Florêncio e outros (2004), e Freire (2006).

Existem diversas propostas para o estudo de afloramentos em 3D, utilizando variadas técnicas. Estudos abordando modelos virtuais de afloramento podem ser encontrados em Pringle e outros (2004); Trinks e outros (2005); Bellian, Kerans e Jennette (2005); e Pringle e outros (2006). Um estudo especial e recente pode ser encontrado em Jones e outros (2007),

esse trabalho aborda a produção de modelo digital de afloramento em escala regional com visualização geológica multiescala em ambiente imersivo.

Os temas geomodelagem e modelagem virtual de afloramento utilizando *Laser Scanner* e GPR possuem considerável literatura. Este capítulo apresentou bibliografia significativa, mas não exaustiva, de trabalhos envolvendo modelagem envolvendo as tecnologias LIDAR e GEORADAR.

Capítulo IV

Metodología experimental

4 Metodologia experimental

A produção de modelos geológicos integrados digitais 3D com potencialidade de visualização em ambiente imersivo envolve diversas tecnologias que não foram produzidas com esse objetivo. Este capítulo trata de um conjunto de técnicas e procedimentos que compõe a metodologia utilizada pelo grupo de pesquisa GEA (Grupo de Estudos de Análogos a Reservatórios Petrolíferos) do laboratório LAE (Laboratório de Análises Estratigráficas) da UFRN na produção de afloramentos digitais.

4.1 Fluxograma de trabalho

A produção de modelos estáticos virtuais 3D é sistematizada em uma metodologia.⁹ O processo de produção é composto de fases bem definidas com métodos e técnicas para cada etapa. É apresentada, a seguir, uma metodologia que abrange todas as fases de construção do modelo, buscando não só disponibilizar métodos¹⁰ eficientes de obtenção do produto especificado com qualidade, mas também abordar questões voltadas para o planejamento, que estão diretamente relacionados ao sucesso do trabalho com prazo e custo previstos. A metodologia é sumarizada na figura 4-1 e detalhada nos parágrafos seguintes.

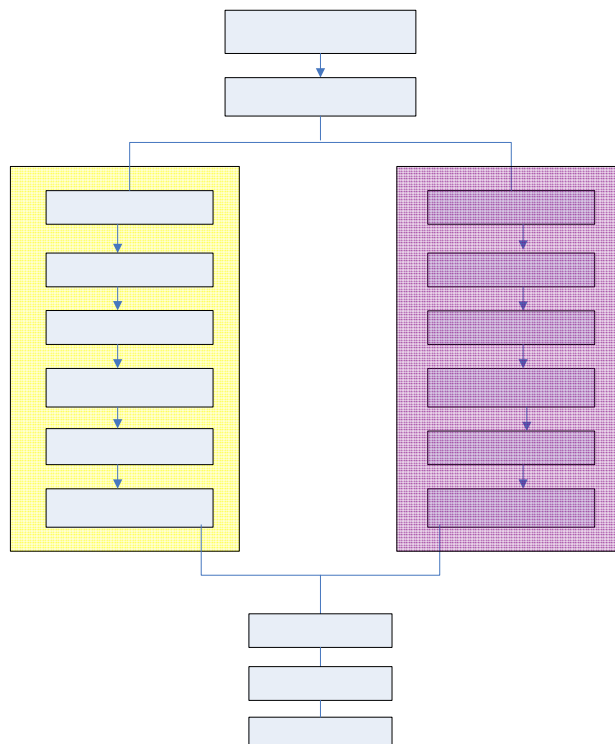


Figura 4-1 – Diagrama simplificado do fluxo metodológico.

⁹ Conjunto de métodos, regras, e postulados utilizados em determinada disciplina, e sua aplicação (Dicionário mini Aurélio, 6ª edição, 2004).

¹⁰ Procedimento organizado que conduz a certo resultado (Dicionário mini Aurélio, 6ª edição, 2004).

O produto da fase de estudo de viabilidade é um relatório elaborado por pessoal experiente, decorrente de visita ao sítio, contendo:

- relatório fotográfico;
- coordenadas geográficas;
- comprimentos e áreas a serem adquiridas;
- registro de ocorrências externas à aquisição que possam comprometer a qualidade do dado levantado;
- parecer sobre a aplicabilidade dos equipamentos envolvidos na aquisição;
- estimativa inicial de prazo de execução e custo;
- restrições legais de acesso a área do sítio;
- opções de acesso, hospedagem, e alimentação;
- parecer sobre a segurança física dos equipamentos e da equipe; e
- outras observações úteis.

Este relatório é conclusivo e indicará ou não a viabilidade de execução do trabalho, e em caso de indicação positiva, devendo ser observadas as necessidades, especificidades, e desafios do trabalho.

A fase de planejamento aprofunda os estudos realizados na fase de estudo de viabilidade, definindo de forma detalhada a execução do trabalho. Diversas atividades devem ser realizadas, entre elas:

- definir o gerente de projeto;
- precisar os requisitos dos produtos intermediário e final;
- recuperar dados técnicos sobre a área e o entorno da aquisição;
- definir os equipamentos necessários e respectivos acessórios;
- definir os produtos de campo e respectivas qualidades mínimas;
- definir os produtos finais e respectivas qualidades mínimas;
- definir as equipes necessárias, com respectivos membros e responsabilidades;
- certificação de equipamentos e acessórios realizado por equipe específica;
- definir a logística, contemplando transporte, roteiro, hospedagem, e alimentação;
- definir cronograma de trabalho; e
- identificar particularidades da aquisição.

O produto da fase é um conjunto de documentos, um para cada equipe, contendo convocação, dados logísticos de interesse, cronograma, trabalho a ser executado com requisitos e respectiva qualidade, e produtos que devem ser entregues ao final do trabalho de campo. Essa documentação e demais informações deverão ser enviadas a todas as equipes em reunião convocada para esse fim.

As aquisições e respectivas documentações são entregues ao gerente de projeto em reunião para esse fim. Os produtos finais serão entregues ao gerente de projeto com memorial descritivo anexo.

4.2 Instrumentação

Este item especifica os equipamentos utilizados nas aquisições das tecnologias LIDAR e GEORADAR, como também equipamentos de apoio.

4.2.1 Tecnologia LIDAR

Foi utilizado o sistema de varredura *laser* HDS3000 (*High Definition Surveying*), fabricado pela Leica Geosystems (www.leica.com). Consiste do equipamento para varredura laser, da estação de trabalho, do *software* de controle Cyclone (www.leica.com), além de outros acessórios como baterias, tripé e *targets* (alvos). A figura 4-2 apresenta um diagrama de bloco do sistema. No computador, está armazenado o banco de dados. Também no computador é executado o *software* Cyclone, que viabiliza a configuração e o controle do HDS3000, o gerenciamento dos dados coletados, e o pós-processamento.

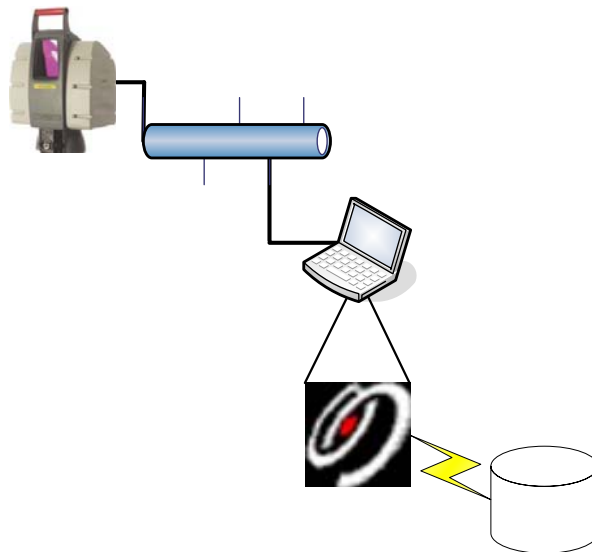


Figura 4-2 – Diagrama de bloco do sistema Laser Scanner HDS3000.

Para configuração e controle do HDS 3000, o fabricante fornece o software Cyclone (www.leica.com) Nesse trabalho foi utilizada a versão 5.7. O equipamento e a licença de uso do software pertencem ao Laboratório de Análises Estratigráficas do Departamento de Geologia da UFRN.

4.2.2 GEORADAR

Foi utilizado o sistema GPR TerraSIRch SIR System-3000, de fabricação Geophysical Survey Systems, Inc. (<http://www.geophysical.com>), número de série P640. Este sistema segue o modelo clássico de GPS, mas integra em um único gabinete os módulos de controle e visualização. O sistema é monocanal, composto por uma unidade de controle e visualização (figura 4-3), um odômetro, quatro baterias, três antenas blindadas (100, 200, e 400 MHz), e cabos e conexões. A configuração do sistema é realizada através da unidade de controle, que também permite visualizar os dados, inclusive em tempo de aquisição. O processamento dos dados adquiridos em campo foram realizados com o software RADAN, versão 6.5 (<http://www.geophysical.com>).

O equipamento e a licença de uso do software pertencem ao Laboratório de Análises Estratigráficas do Departamento de Geologia da UFRN.



Figura 4-3 – Unidade de controle e visualização do Sistema GPR TerraSIRch SIR System-3000

4.2.3 Estação Total

Uma estação total corresponde a um conjunto definido por um Teodolito Eletrônico, um distanciômetro a ele incorporado e um microprocessador que automaticamente monitora o estado de operação do instrumento. Assim, a estação total assume as funções de um teodolito comum, ou seja, mede ângulos verticais e horizontais, além de distâncias horizontais, verticais e inclinadas (distanciômetro). Este equipamento ainda processa e exibe ao operador, através de seu *display*, informações como: condições do nivelamento do aparelho, descrição do ponto medido, as coordenadas em UTM ou geográficas dos pontos coletados, altitude, altura do aparelho, e bastão.

A tecnologia empregada nas medições do aparelho envolve o uso de sensores que atuam no comprimento de onda infravermelho, onde o pulso é emitido pela estação, reflete no alvo e retorna à estação trazendo as coordenadas (N, E, Z) do alvo. Os dados são então processados e armazenados automaticamente no próprio aparelho.

A estação total utilizada neste trabalho é de fabricação Topcon Positioning Systems, Inc (<http://www.topconpositioning.com>), modelo CTS 3007 (figura 4-4), pertencente ao Laboratório de Análises Estratigráficas do Departamento de Geologia da UFRN. O conjunto é composto pela estação total, um tripé, e dois bastões acompanhados com prismas e suportes para estes. Esta Estação total possui um alcance de 3.000 m com apenas um prisma e até 250 m para leituras sem prisma, precisão linear de 3 mm + 2 ppm com prisma, memória para 12.000 pontos de medição ou 24.000 pontos de coordenadas.



Figura 4-4 – Estação Total Topcon CTS 3007 utilizada para correção topográfica
Fonte: Topcon Positioning Systems, Inc.

4.2.4 Integração de dados e modelagem 3D

O software GOCAD (Geological Object Computer Aided Draw) (<http://GOCAD-download.pdgm.com>) é uma ferramenta aderente aos princípios da modelagem geológica, o qual permite a criação, importação, modificação, integração, visualização e exportação de objetos geológicos 3D. O GOCAD também possibilita a visualização de dados geológicos no espaço tridimensional, permitindo a construção de modelos estáticos, usados frequentemente na indústria petrolífera. Por conseguinte, é adequado para integrar os dados do Laser Scanner e GPR, que serão vistos como geoobjetos.

Este *software* possui inúmeros recursos, destacando-se: recuperação e tratamento de dados; mapeamento; operações com superfícies; cálculo de reservas; edição e interpretação de perfis; digitalização; visualização e edição gráfica; facilitação para métodos potenciais; e

recursos de SIG (Sistema de Informações Geográficas). A visualização 3D, ou seja, a representação de objetos é disponibilizada em janelas de visualização tridimensionais, permitindo modificar todas as propriedades dos objetos, como também rotacionar, transladar, aproximar, e afastar. Estão disponíveis ferramentas para exagero vertical de superfícies, "renderização", e "antialiasing", possibilitando imagens de alta qualidade mostrando as superfícies em modalidade *wireframe* (GOCAD, 2004).

O GOCAD é fruto de um consórcio internacional composto por empresas da indústria petrolífera e de universidades (<http://www.GOCAD.org/www/consortium/index.xhtml>), do qual a PETROBRAS faz parte desde 1996. O consórcio tem como objetivo desenvolver novos métodos de modelagem interativa da geometria e propriedades de objetos geológicos complexos, para aplicações em geologia, geofísica, e engenharia de reservatórios. É utilizado pela PETROBRAS com o objetivo de acelerar o processo de desenvolvimento de soluções voltadas para a modelagem geológica, com ênfase nas áreas de engenharia de reservatórios.

Este trabalho foi desenvolvido utilizando a versão 2.5 do GOCAD, cuja licença é pertencente ao Laboratório de Análises Estratigráficas do Departamento de Geologia da UFRN.

4.3 Métodos

A construção de modelos geológicos estáticos digitais 3D requer fidelidade para fornecer para a engenharia de reservatório dados com qualidade necessária. A seguir estão descritos o conjunto de procedimentos fundamentais para a obtenção dos produtos intermediários e final da modelagem geológica no âmbito das pesquisas do LAE/GEA. Os procedimentos mencionados solucionam questões abertas e consolida experiências anteriores do grupo de pesquisa (Menezes, 2004); (Reyes--Perez *at all*, 2004); (Freire, 2006); (Gauw *at all*, 2006). São procedimentos fruto do estudo teórico, da prática do grupo de pesquisa, e da experiência pessoal vivenciada no desenvolvimento deste trabalho.

4.3.1 Trabalho de campo

Os métodos empregados em campo são determinantes no sucesso da modelagem. Nenhum processamento posterior ao campo corrigirá operações deficientes realizadas durante a aquisição. A seguir é descrito os procedimentos necessários e organizados ao correto desenvolvimento do trabalho de campo.

4.3.1.1 Área de Trabalho

A área definida para o emprego das técnicas de mapeamento digital se localiza na borda sudeste da Bacia do Parnaíba, no Parque Nacional da Serra das Confusões no estado do Piauí, nordeste do Brasil (figura 4-5). Esta área foi definida em função da qualidade e extensão dos seus afloramentos, como também por estar incluída no projeto PARAMETRIX/PETROBRAS/FINEP. Este projeto tem como um dos objetivos avaliar as técnicas de aquisição de dados geológicos de superfície com a tecnologia LIDAR integrado com os dados de subsuperfície obtidos com a tecnologia GEORADAR, como também a construção de um modelo determinístico 3D de afloramentos análogos a reservatórios petrolíferos.

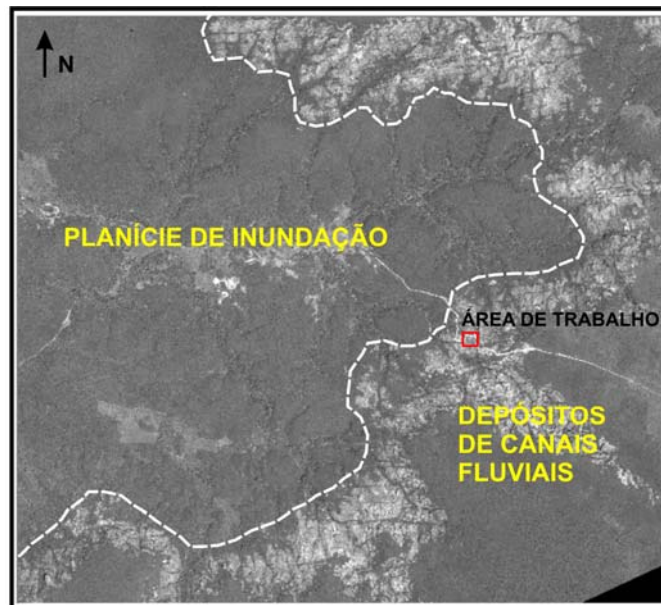


Figura 4-5 – Área de trabalho localizada no Parque Nacional da Serra das Confusões, Municípios de Caracol, Estado do Piauí. Imagem de satélite *Quickbird*.



Figura 4-6 – Vista geral da área de levantamento, com afloramento modelado em primeiro plano.

O levantamento da área foi realizado em março de 2007, compartimentado em duas etapas, uma de superfície com o *Laser Scanner* e outra de subsuperfície com o GPR.

4.3.1.2 Aquisição com Laser Scanner

Primeiramente serão descritos os procedimentos para aquisição da superfície do afloramento. A primeira providência em campo foi montar e identificar três conjuntos de tripé, bastão, e *target*, nomeados de conjunto 1, conjunto 2, e conjunto 3. Utilizando uma estação total, os conjuntos foram retificados quanto à verticalização e à escala impressa.

A primeira retificação visa certificar a verticalização do acessório. Consistiu em localizar com a estação total retificada, três pontos materializando os vértices de um triângulo retângulo. Em seguida, posicionou-se o bastão, nivelado, apoiado em tripé, na posição adjacente aos menores lados. Em cada um dos outros dois vértices, procedeu-se da seguinte forma: estacionou-se a estação total no ponto, com centragem utilizando prumo ótico; em seguida procedendo visada no eixo vertical do bastão; verificou-se a verticalização através de basculamento da estação total sobre o eixo do bastão; o ajuste necessário foi realizando, utilizando-se os parafusos de retificação do nível de bolha.

Certificar a escala impressa corresponde a verificar o desgaste do pé do bastão. Primeiramente, foi definido um prisma para todas as certificações. O processo consistiu em definir uma superfície plana e, sobre esta, colocar o bastão com o prisma, nivelado e apoiado sobre tripé, com a escala marcando 1800 mm. Com a estação total mediu-se a distância da

extremidade inferior do pé do bastão até o eixo horizontal do prisma. O resultado médio encontra-se resumido na tabela 4-1.

TABELA 4-1 - RESUMO DOS DADOS OBTIDOS NA CERTIFICAÇÃO DE BASTÕES.

	Medida de baixo para cima (mm)	Medida de cima para baixo (mm)	Medida de baixo para cima (mm)	Constante adotada	Desvio Adotado (mm)
Conjunto 1	1820	1818	1820	1820	20
Conjunto 2	1823	1823	1822	1823	23
Conjunto 3	1823	1825	1823	1824	24

Os desvios foram confirmados em dois outros experimentos com a escala marcando 2500 mm e 1500 mm. Confrontando todas as medições, observou-se que há uma variação maior nas medidas dos extremos do bastão que na altura do equipamento. Os desvios são aceitáveis e serão utilizados para corrigir a leitura na escala gráfica integrada ao acessório.

Em campo, observou-se a necessidade de um quarto conjunto, para tanto foi confeccionado o Conjunto 4 com o bastão substituído por segmento de tubo de PVC de 25 mm de diâmetro. Em uma das extremidades foi anexada uma peça em madeira na forma de cone com o objetivo de imitar a extremidade inferior do bastão. Na outra extremidade, foi fixado o *target*. O tripé foi substituído por estaiamento a aproximadamente 120^o construído com fio encapado de 1,5 mm². O conjunto foi certificado com 0,985 m de comprimento.

A etapa seguinte consistiu em elaborar um croqui da área do afloramento, e paralelamente, definir as estações de imageamento. A acurácia do registro de nuvens depende da distribuição geométrica do *targets* envolvidos no registro (Elkhrachy & Niemeier, 2006). Jacobs (2005) recomenda que a distribuição espacial dos *targets* forme um volume virtual, não regular, com o *Laser Scanner* no centro. Assim, a definição das locações (estações) procurou contemplar, além da distribuição espacial dos *targets*, imagear todo o afloramento, evitando oclusões. As locações são mostradas na figura 4-7. A técnica de aquisição e registro adotada foi o princípio nuvem-a-nuvem com a técnica *targets* como pontos de controle.

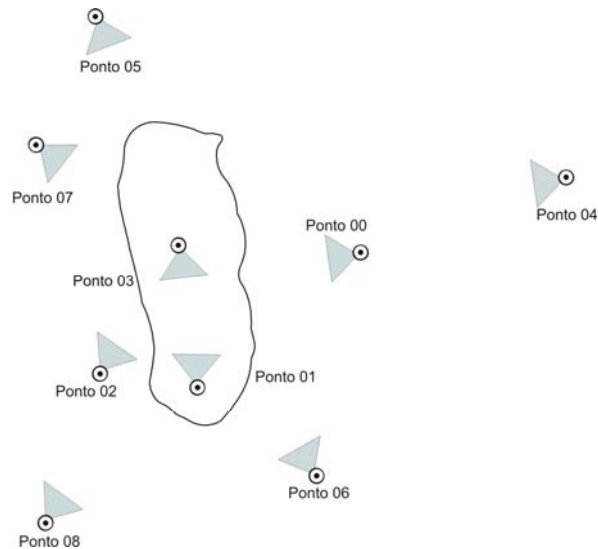


Figura 4-7 – Diagrama contendo o contorno do afloramento com a indicação das estações.

As estações denominadas Ponto_Zero, Ponto_Um, Ponto_Dois, e Ponto_Três possuem registro em rocha materializado com bucha de *nylon* e parafuso. Os demais pontos possuem marcação por tinta acrílica.

As aquisições foram realizadas nas seguintes datas:

- 10/03/2007 - Estações Ponto_Zero, Ponto_Um, Ponto_Dois, e Ponto_Três;
- 11/03/2007 - Estação Ponto_Quatro; e
- 12/03/2007 - Estações Ponto_Cinco, Ponto_Seis, Ponto_Sete, e Ponto_Oito.

Imediatamente após a aquisição com o *Laser Scanner* nas estações Ponto_Zero, Ponto_Um, Ponto_Dois, Ponto_Três, e Ponto_Quatro, foi instalada a Estação Total e realizadas visadas no centro do *target* das demais estações. No Ponto_Quatro, utilizou-se apenas o conjunto 2 para visadas nos *targets* nas estações Ponto_Um, Ponto_Dois, e Ponto_Três. Para todas as aquisições, com exceção do conjunto 4, os demais foram montados com a régua marcando 1,5 m. Essas informações serão utilizadas na fase de processamento quando do registro dos imageamentos.

O processo de aquisição em todas as estações segue o seguinte programa:

- montagem física do *Laser Scanner*¹¹;
- montagem da estação de gerenciamento¹²;
- carga e configuração inicial básica do sistema¹³;

¹¹ Retirada do equipamento do módulo de transporte, locação do tripé, locação do equipamento utilizando prumo óptico, e nivelamento.

¹² Conexão de baterias, cabos de força, cabos lógicos, carga dos sistemas operacional.

¹³ Carga do *software* Cyclone, definição do banco de dados.

- obtenção de foto em baixa resolução da área a ser imageada através da função *image*, utilizando a câmera integrada do *Laser Scanner*;
- configuração de parâmetros de imageamento através da interface *Scan Control*;
- inclusão do nome do *project*;
- inclusão do nome da *ScanWorld*;
- inclusão das resoluções vertical e horizontal, para a distância de locação;
- inclusão da pressão atmosférica;
- inclusão da temperatura;
- definição dos filtros de distância e/ou intensidade;
- obtenção de foto em alta resolução, utilizando a câmera integrada do *Laser Scanner*; e
- imageamento da cena através da função *Scan*.

O parâmetros *Project* permite diversas interpretações. Nesse trabalho, é considerado como o imageamento completo de uma estação, ou seja, em cada local que o *Laser Scanner* foi estacionado. O parâmetro *ScanWorld* corresponde a uma cena.

O projeto do levantamento não adotou uma resolução rígida, mas um valor não superior a uma malha de 10 por 10 cm na superfície do afloramento. A distância do *Laser scanner* à superfície do objeto foi obtida com a função *Probe*.

O parâmetro temperatura ambiente foi obtida a cada cena com termômetro Minipa modelo MT-242. A pressão atmosférica foi estimada em 760 mm de Hg.

Os filtros de distância e/ou intensidade permitem que reflexões com distâncias ou reflectância abaixo ou acima de valores configurados sejam descartadas. Nesse trabalho não foram utilizados esses filtros, havia interesse da nuvem de pontos sem restrições.

O controle de qualidade do imageamento em tempo de aquisição foi realizado através da função *Open Viewer*, que permite visualizar em tempo real a produção da nuvem de pontos.

O ambiente de configuração, controle, e execução do imageamento é apresentado na figura 4-8.

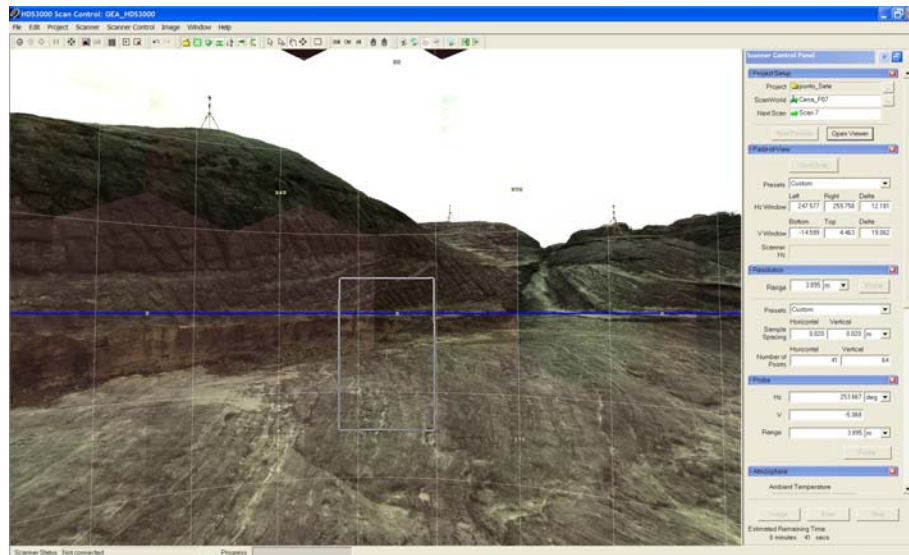


Figura 4-8 – Ambiente de configuração, controle, e aquisição do objeto de estudo. Em destaque, a fotografia obtida na estação denominada Ponto_Sete.

Após a conclusão de todas as cenas do afloramento nesta estação, a etapa seguinte é a aquisição dos *targets*, já que o modo de registro será por *targets*. Mas, antes da aquisição, os mesmos foram escaneados em cenas individuais com resolução por malha quadrada de 1 cm por 1 cm. Após essa tarefa, o centro do *target* foi adquirido através da função *Acquire targets*. Esse procedimento define um ponto no espaço da nuvem, com precisão submilimétrica, denominado *Vertex*.

Em fevereiro de 2006, esteve, na mesma área da aquisição desta dissertação, outra equipe que levantou um afloramento próximo. Na ocasião do levantamento, não foi considerada a possibilidade de anexá-lo a outra aquisição no futuro. É um dos objetivos desta dissertação compor as duas aquisições em um único modelo estático 3D, gerando uma metodologia para situações semelhantes, e produzindo recomendações para que as futuras aquisições contenham pontos de controle que permitam, eventualmente, registro de aquisições realizadas em períodos diferentes.

As figuras a seguir mostram as nuvens de pontos obtidas em cada uma das estações.

Project: Ponto_Zero
 ScanWorld: automático
 Temperatura: 30^o C
 Pressão atmosférica: 760 mmHg
 Densidade de pontos: malha de 2 cm por 2 cm
 Range: 30 m
 Altura do Laser Scanner: 1191 mm
 Estação 01: Conjunto 1
 Estação 02: Conjunto 2
 Estação 03: Conjunto 3
 Estação 04: Conjunto 4
 Número de cenas: 13
 Total de Pontos: 1.734.953

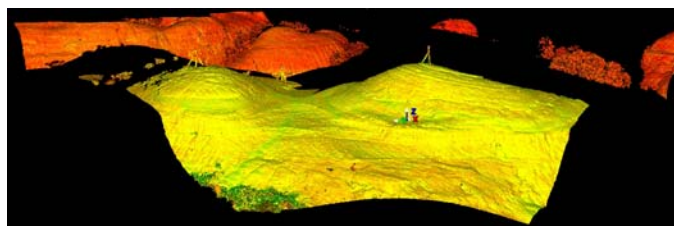


Figura 4-9 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Zero, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Um
ScanWorld: automático
Temperatura: 30^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 4 cm por 4 cm
Range: 50 m
Altura do Laser Scanner: 1512 mm
Estação 00: Conjunto 1
Estação 02: Conjunto 2
Estação 03: Conjunto 3
Estação 04: Conjunto 4
Número de cenas: 20
Total de Pontos: 1.760.094

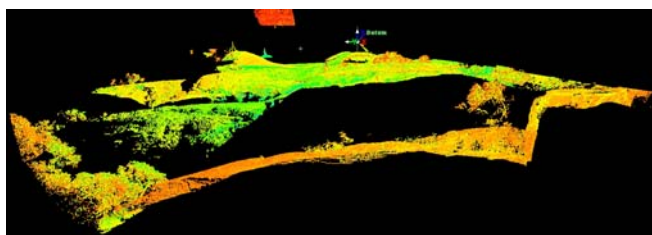


Figura 4-10 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Um, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Dois
ScanWorld: automático
Temperatura: 30^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 4 cm por 4 cm
Range: 50 m
Altura do Laser Scanner: 1482 mm
Estação 00: Conjunto 1
Estação 01: Conjunto 3
Estação 03: Conjunto 2
Estação 04: Conjunto 4
Número de cenas: 17
Total de Pontos: 1.736.374

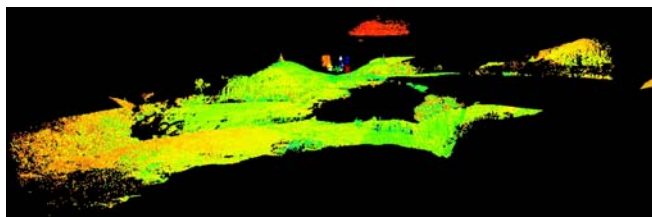


Figura 4-11 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Dois, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Tres
ScanWorld: automático
Temperatura: 30^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 4 cm por 4 cm
Range: 50 m
Altura do Laser Scanner: 1444 mm
Estação 00: Conjunto 1
Estação 01: Conjunto 3
Estação 02: Conjunto 2
Estação 04: Conjunto 4
Número de cenas: 18
Total de Pontos: 1.740.031

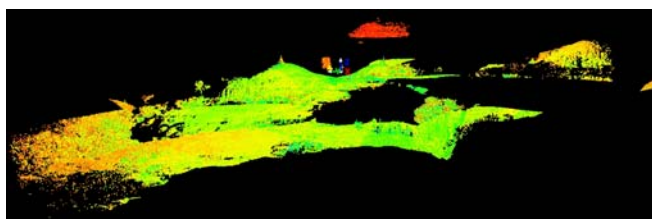


Figura 4-12 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Zero, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Quatro
ScanWorld: automático
Temperatura: 28^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 4 cm por 4 cm
Range: 50 m
Altura do Laser Scanner: 1462 mm
Estação 00: Conjunto 4
Estação 01: Conjunto 1
Estação 02: Conjunto 2
Estação 03: Conjunto 3
Estação ET1: Conjunto 1
Estação ET2: Conjunto 2
Estação ET3: Conjunto 3
Estação ET4: Conjunto 4
Número de cenas: 24
Total de Pontos: 4.144.750

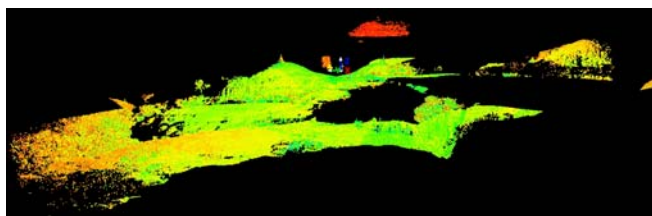


Figura 4-13 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Quatro, com a configuração utilizada para a obtenção.

O Ponto 4 foi definido para viabilizar o registro da aquisição atual com a aquisição de março de 2006. As estações ET1, ET2, ET3, e ET4 estão localizadas na área do afloramento da aquisição anterior.

Project: Ponto_Cinco
ScanWorld: automático
Temperatura: 28^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 3 cm por 3 cm
Range: 70 m
Altura do Laser Scanner: Não obtido
Estação 00: Conjunto 4
Estação 01: Conjunto 1
Estação 02: Conjunto 2
Estação 03: Conjunto 3
Número de cenas: 14
Total de Pontos: 682.474

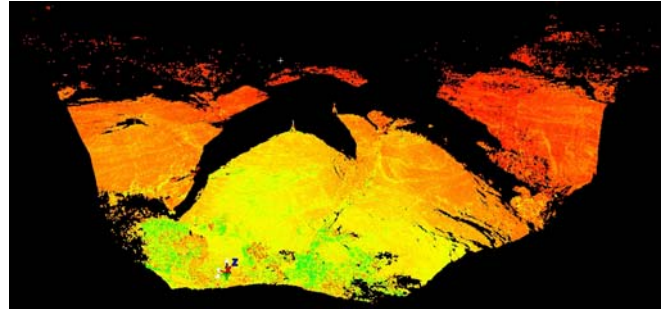


Figura 4-14 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Cinco, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Seis
ScanWorld: automático
Temperatura: 28^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 2 cm por 2 cm
Range: 20 m
Altura do Laser Scanner: Não obtido
Estação 00: Conjunto 4
Estação 01: Conjunto 1
Estação 02: Conjunto 2
Estação 03: Conjunto 3
Número de cenas: 8
Total de Pontos: 989.138

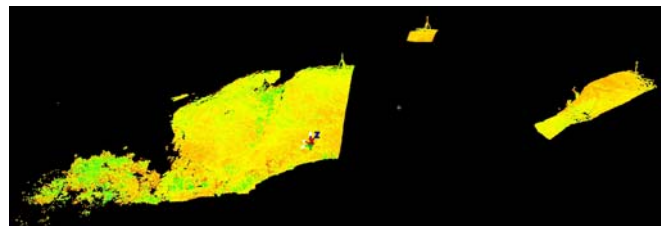


Figura 4-15 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Seis, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Setete
ScanWorld: automático
Temperatura: 28^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 3 cm por 3 cm
Range: 10 m
Altura do Laser Scanner: Não obtido
Estação 00: Conjunto 4 - Não visível
Estação 01: Conjunto 1
Estação 02: Conjunto 2
Estação 03: Conjunto 3
Número de cenas: 9
Total de Pontos: 1.479.510

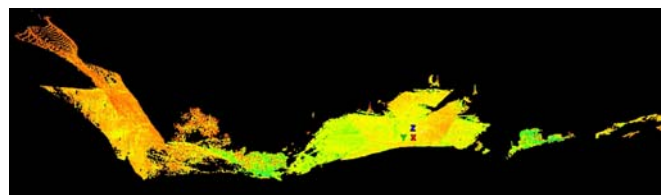


Figura 4-16 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Setete, com a configuração utilizada para a obtenção.

Project: Ponto_Oito
ScanWorld: automático
Temperatura: 28^o C
Pressão atmosférica: 760 mmHg
Densidade de pontos: malha de 2 cm por 2 cm
Range: 10 m
Altura do Laser Scanner: Não obtido
Estação 00: Conjunto 4 - Não visível
Estação 01: Conjunto 1
Estação 02: Conjunto 2
Estação 03: Conjunto 3
Número de cenas: 8
Total de Pontos: 232.910

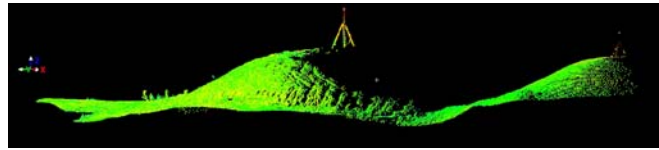


Figura 4-17 – Visão parcial da nuvem de pontos obtida na estação Ponto_Oito, com a configuração utilizada para a obtenção.

A tarefa final foi providenciar copia de segurança redundante dos dados e preparar o equipamento e acessórios para traslado de retorno.

As imagens obtidas com a câmera fotográfica integrada do *Laser Scanner* são utilizadas, não só para orientar o contorno da região a ser imageada, mas também como uma das possibilidades para textura do produto final. A cena capturada (*multimage*) é formada pelo registro de imagens menores, ou seja, é um fotomosaico. A câmera integrada de 1 mega pixel não dispõe de mecanismo automático de compensação ótico, ficando a cargo do operador. Na prática, a obtenção de fotografias é dependente da incidência adequada da luz solar. A passagem de uma nuvem pode comprometer a qualidade da fotografia pela diferença de brilho. O equipamento não pode ser removido da estação até que a nuvem de pontos e a fotografia tenham a qualidade prevista. Essa limitação pode comprometer o planejamento da permanência em campo. Nesse trabalho, essa característica foi considerada uma limitação.

O *laser Scanner* teve baterias seladas como fonte de força. O acessório se mostrou frágil, com indicações imprecisas de carga, por vezes desligando o sistema de forma inesperada. Embora o equipamento permita conexão de duas baterias simultaneamente, a experiência mostrou que é recomendável uma fonte AC/DC (corrente alternada / corrente contínua), quando possível, mesmo conectado a um conjunto gerador, ou tomada de força em veículo automotivo.

4.3.1.3 Aquisição com GPR

A aquisição com GPR, foi iniciada com a definição dos locais e extensões dos perfis. A etapa seguinte consistiu em agregar essas informações à documentação de campo. A figura 4-18 ilustra a localização das linhas de aquisição com relação ao afloramento.



Figura 4-18 – Diagrama contendo o contorno do afloramento com as indicações das linhas de aquisição.

Existem três técnicas de aquisição com GPR: perfil de reflexão; sondagem de velocidade (CMP, *common mid point*); e trans-iluminação (*trasillumination*). (Bristow e Jol, 2003) descrevem detalhadamente os três modos. Na prática, o mais utilizado é o modo perfis de reflexão com afastamento constante (*Commom Offset*). Esse processo consiste em deslocar o sistema GPR, numa geometria de antena constante, ao longo de uma linha, realizando explorações consecutivas, obtendo uma imagem da variação das propriedades dielétricas em subsuperfície do perfil abaixo da linha. Esta técnica pode adquirir dados no modo passo-a-passo ou contínuo. Neste último, a exploração é determinada segundo um período de tempo ou espaçamento pré-fixado.

Este trabalho utilizou a técnica perfis de reflexão com afastamento constante no modo contínuo para obter os perfis de reflexão ao longo das linhas definidas. Mas utilizou a técnica CMP para estimar a velocidade RMS (*Root Mean Square*) das ondas eletromagnéticas em subsuperfície para calcular a constante dielétrica média do meio. Esta técnica consiste em afastar as antenas, transmissora e receptora, em sentidos opostos, de modo que o ponto médio permaneça fixo. As antenas são estacionadas em intervalos regulares onde são realizadas aquisições. Ao final, utilizando o método $t^2 - x^2$, bem difundido nos trabalhos sísmicos, obtém-se um gráfico (figura 4-19) da distância pelo tempo (Porsani, 2001). Nesse gráfico, os refletores tendem a hipérbolas de primeira ordem, enquanto as ondas aéreas e terrestres tendem a uma reta. A inclinação das retas é inversamente proporcional às respectivas velocidades. Estudo detalhado abordando análise de velocidade pode ser encontrado em (Causse & Sénéchal, 2006); (Botelho *et al.*, 2003); (Reppert; Morgan; Toksöz, 1999); (Tillard & Dubois, 1993). Método prático detalhado pode ser encontrado em (GSSI, 2005).

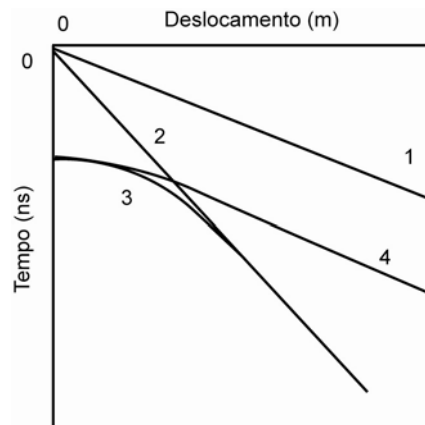


Figura 4-19 – Sondagem de velocidade do tipo COM, gráfico típico do tempo de chegada em função da separação das antenas.

Fonte: Adaptado de (Annan, 2001)

Após a definição dos locais de aquisição dos perfis GPR, a etapa seguinte foi estimar a velocidade e a constante dielétrica em subsuperfície aplicando a técnica CMP. Para a tarefa, foi utilizada a antena de 80 MHz, seguindo as recomendações do manual do fabricante do equipamento (GSSI, 2005).

Previamente à etapa de campo de uma aquisição GPR, deve ser realizado um estudo de viabilidade. Annan (2001) sugere a seqüência de avaliações a seguir:

- definição dos objetivos e requisitos da aquisição;
- avaliação da aplicabilidade da técnica utilizando a equação de alcance do radar ou aplicando a técnica de simulação numérica;
- determinação da profundidade do alvo (equação 2-4);
- determinação da energia refletida (equação 2-6);
- determinação da presença de fatores limitantes (vistoria na área do levantamento quanto a fontes de ruído eletromagnético); e
- Definição dos parâmetros de aquisição:
 - frequência de operação da antena (equação 2-14);
 - janela temporal de amostragem (equação 2-15);
 - intervalo temporal de amostragem (equação 2-16);
 - espaçamento entre estações (equação 2-17);
 - separação das antenas (equação 2-18);
 - orientação das antenas (Lutz et al., 2003);
 - sistema de coordenadas para georreferenciamento.

No que se refere à orientação das antenas, alguns arranjos são fixos, como é o caso das antenas blindadas. Um estudo mais detalhado abordando a influência do arranjo das antenas pode ser encontrado em (Lutz et al., 2003).

O objetivo da aquisição GPR para esse trabalho era obter o maior número de geometrias posicionais possíveis, ou seja, um trabalho exploratório e interativo, realizado com diversas antenas e configurações. Dessa forma, não foi necessário realizar o estudo de viabilidade prévio, ou seja, não havia um alvo específico a ser buscado.

Após a definição das linhas de perfil, a providência seguinte foi a obtenção da topografia das respectivas linhas. Para a tarefa foi utilizada uma estação total e prisma.

Durante todo o processo de aquisição foram observados eventos que pudessem introduzir ruídos na gravação do perfil GPR. Algumas das anotações realizadas são: rugosidade da superfície de arrasto da antena; croquis e anotações relevantes de refletores e anomalias ao longo do perfil; eventos imprevistos como choque mecânico na antena, e salto desta. Enfim, a caderneta de campo procurou conter todo e qualquer evento ou condição que possa ser útil durante o processamento e interpretação.

O GPR utilizado neste trabalho possui dois conjuntos de configurações, um para aquisição e outro para rever as aquisições (GSSI, 2005). Estão incluídos: configuração da antena; modo de aquisição; uso de GPS; intervalo temporal de amostragem; bits por amostragem; traço por metros; constante dielétrica; e diversos filtros.

Para realizar a análise de velocidade e obter a constante dielétrica, foi realizada uma aquisição com configuração de antena biestática no modo CMP sobre a linha 2 (figura 4-18). Para a aquisição foi utilizada uma antena de 80 MHz, as demais antenas em campo eram do tipo blindada. O software TerraSIRch é o módulo de configuração e gerência do sistema GPR utilizado na aquisição. É pré-configurado para aquisições no modo CMP visando análise de velocidade. Produz além do arquivo de aquisição (extensão .dzt), um arquivo de velocidades (extensão .vlc) que será utilizado pelo *software* de processamento RADAN para estimar a velocidade no meio.

Foram adquiridas 35 seções, em modo contínuo, com antenas blindadas de 100, 200, e 400 MHz. Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos em todas as aquisições:

- constante dielétrica = 6,02;
- intervalo temporal de amostragem (Samples/Scan) = 512;
- bits por amostragem (Bits/Sample) = 16; e
- traço por metros (Scans/Meter) = 40.

O valor da constante dielétrica é utilizado apenas para estimar a profundidade, em tempo real, durante a aquisição; o que é registrado é o tempo duplo do pulso. Os valores dos parâmetros "intervalo temporal de amostragem" e "traço por metros" são frutos da experiência de trabalhos anteriores, possibilitando uma resolução satisfatória com arquivos de tamanho compatível com a memória do equipamento. O valor do parâmetro "bits por amostragem" é o máximo que o equipamento permite. Os parâmetros "frequência de operação", "separação das antenas", e "orientação das antenas" são imposições do fabricante que aqui foram honradas.

O detalhamento das seções de aquisição encontra-se no anexo 2 deste trabalho. As figuras 4-20 e 4-21 registram dois momentos da aquisição GPR.



Figura 4-20 – Aquisição de perfil GPR na linha 2 com antena de 100 MHz.



Figura 4-21 – Aquisição de perfil GPR na linha 1 com antena de 400 MHz.

4.3.2 Processamento

4.3.2.1 Processamento das aquisições com Laser Scanner

A fase de processamento de uma aquisição de *Laser Scanner* é realizada em laboratório e consta das seguintes etapas:

- preparação dos dados;
- registro da nuvem de pontos;
- exclusão de pontos desnecessários;
- apresentação do produto final; e
- exportação;

A fase de preparação dos dados consistiu em: recuperar dados e documentação de campo; produzir cópias da documentação e de segurança do banco de dados; submeter o controle de qualidade sobre dados brutos; e selecionar os dados para processamento. Para a execução da tarefa são utilizadas apenas as ferramentas nativas do sistema operacional.

O registro da nuvem de pontos consiste em colocar todos os imageamentos no mesmo sistema de coordenadas. A tarefa é realizada através do ambiente *Registration* (figura 4-22) do *software* Cyclone (Cyclone, 2004).

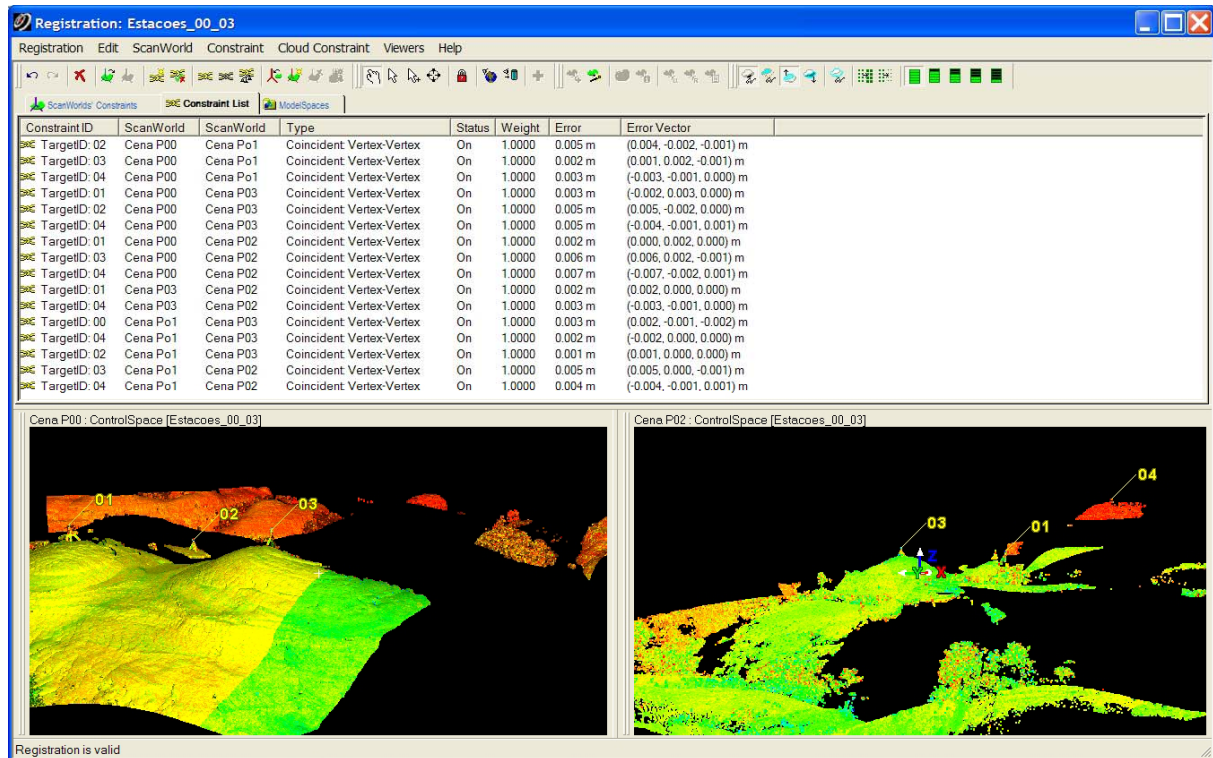


Figura 4-22 – Registro das nuvens de pontos das estações Ponto_Um, Ponto_Dois, e Ponto_Três, no ambiente de registro de nuvem de pontos (*Registration*) do *software* Cyclone.

Nesse trabalho, esse registro foi realizado em cinco tarefas:

- registro das estações Ponto_Zero, Ponto_Um, Ponto_Dois, e Ponto_Três, produzindo a nuvem de pontos consolidada Bloco_1;
- registro das estações Ponto_cinco, Ponto_seis, Ponto_sete, e Ponto_oito, produzindo a nuvem de pontos consolidada Bloco_dois;
- registro dos blocos Um e Dois produzindo a nuvem de pontos afloramento_Novo;
- Agregação da nuvem de pontos do afloramento_Novo com o imageamento Ponto_Quatro, gerando a nuvem de pontos Afloramento_março_2007.

As primeiras duas tarefas utilizaram *targets*, possibilitando que o maior erro (7 mm) esteja próximo da acurácia do equipamento (6 mm). Relatório detalhado de erros das duas tarefas pode ser encontrado no anexo 3 deste documento.

O Bloco_1 pode ser associado à rede de pontos levantada com a estação total, o que não ocorre com Bloco_2. Dessa forma, o registro por rede de pontos fica descartado. Registro

por superposição de nuvens exige adicionalmente superposição acima de 10%, e uma identificação precisa dos mesmos pontos nas duas nuvens. Pela característica da superfície do afloramento, essa identificação mostrou-se de difícil execução e com baixa produtividade. Não havendo, com precisão, pontos bem definidos. Assim, a técnica de registro por *targets* foi utilizada. Incluindo todas as nuvens obteve-se 69 restrições, com o menor erro igual a 2 mm, e o maior igual a 108 mm. Observa-se pelo relatório de erros que o *target* 02 está envolvido com os maiores erros. Desligando sucessivamente as restrições com os maiores erros, chega-se a 54 restrições, maior erro igual a 8 mm, e o menor igual a 1 mm. Refazendo o registro não mais com todas as nuvens, mas com os dois blocos, obtém-se 4 restrições com o menor erro igual a 4 mm, e o maior igual a 246 mm. Retirando a restrição de maior erro, restam 3 restrições com o menor erro igual a 4 mm, e o maior igual a 8 mm. Assim, qualquer um dos procedimentos pode ser adotado, para esse trabalho foi adotado o segundo procedimento.

O resultado obtido é considerado satisfatório, considerando que o erro foi de 2 mm acima da acurácia do equipamento, que, segundo o fabricante, é de 6 mm a 50 m (Cyclone, 2004). No entanto, segundo testes realizados por Wutke (2006), a acurácia do laser scanner Cyrax HDS 3000 a 50 m é de 7 mm, chegando a 12 mm a 107 m. Portanto, o registro está apenas 1 mm de erro acima da acurácia do equipamento em testes controlados, o que satisfatório para esse tipo de aplicação.

A tarefa 4 teve os mesmos procedimentos e estratégia anteriores, consolidando com 3 restrições e erros de 19, 30, e 38 mm. O erro foi considerado aceitável, dado as dimensões do levantamento e os objetivos da aquisição que admitem erros superiores ao valor obtido.

Em março de 2006 foi realizado um levantamento com Laser Scanner em afloramento próximo ao deste trabalho. Desse levantamento estão disponíveis o banco de dados contendo as nuvens de pontos obtidas em campo e o produto final (figura 4-23). O registro foi realizado aplicando o princípio da nuvem-a-nuvem tendo feições como pontos de controle. Na ocasião não foi vislumbrado futuras aquisições na área, assim, nenhum procedimento nessa direção foi providenciado. É um dos objetivos deste trabalho propor os procedimentos necessários para permitir, com acurácia, levantamentos futuros na área, mesmo não previsto. Também é objetivo propor uma solução de registro satisfatório para os levantamentos atual e de março de 2006.

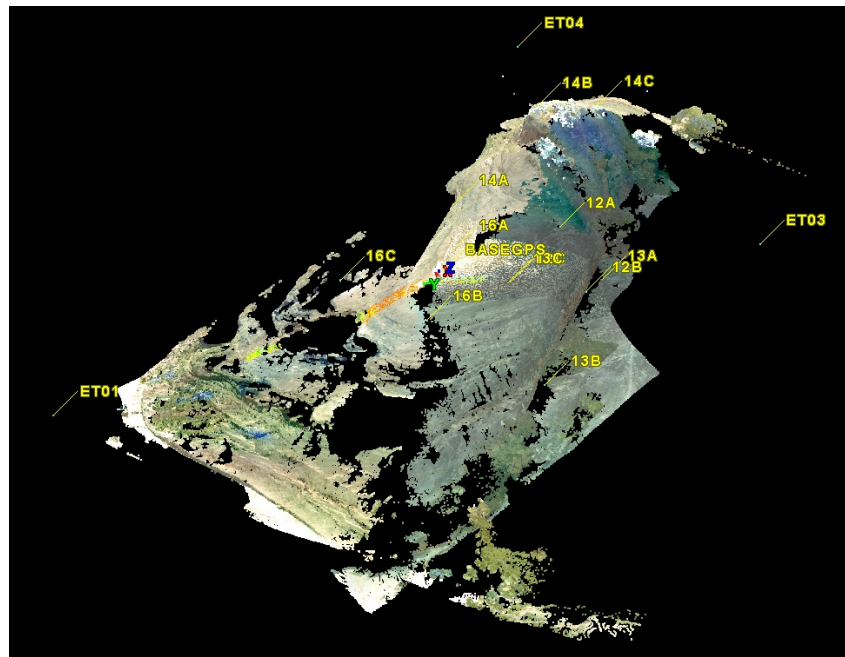


Figura 4-23 – Registro da aquisição de fevereiro de 2006, destacando os pontos de controle utilizados.

Na fase de planejamento foi definido que a técnica de registro utilizaria o princípio da Rede por irradiação a partir da estação Ponto_Quatro. A rede seria materializada pelos pontos correspondente as estações Ponto_Zero, Ponto_Um, Ponto_Dois, Ponto_Três, e Ponto_Quatro da aquisição de março 2007, mais os pontos ET01, ET02, ET03, e ET04 pertencentes à aquisição de março 2006. O primeiro conjunto, foi adquirido em campo, enquanto o segundo conjunto seria definido por *targets* virtuais correspondentes às feições na superfície do afloramento.

Na aquisição de março de 2007, os pontos nós da rede foram definidos na vertical dos respectivos *targets*, corrigida da altura do bastão certificado. Na aquisição de 2006 as feições não foram facilmente identificáveis com precisão. A rede construída no ambiente do Cyclone pode ser visualizada na figura 4-24.

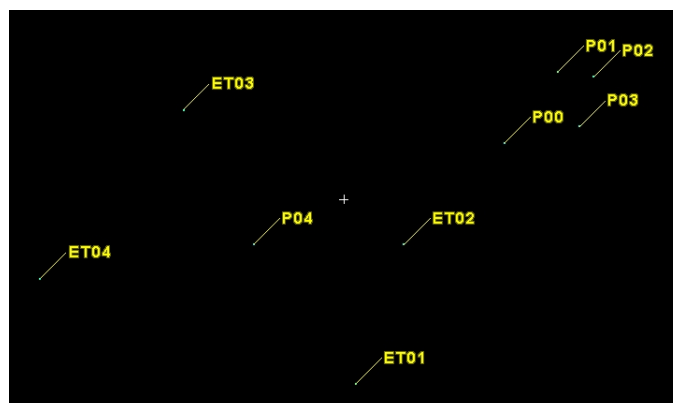


Figura 4-24 – Rede de pontos para registro das aquisições de 2006 e 2007.

O processo de registro foi realizado utilizando com menor erro igual a 39 mm, e o maior 622 mm. Em laboratório optou-se por um registro por nuvens, que redundou em 119 restrições; 8 restrições desabilitadas; com o maior valor de 137 mm, o menor de 0 mm, com desvio padrão de 1,5 mm. O erro foi considerado aceitável, dado os objetivos do trabalho e distâncias na ordem de 200 m. Isso comprova a eficiência do método de sobreposição de nuvens. A figura 4-25 mostra o registro das nuvens de pontos dos dois afloramentos.

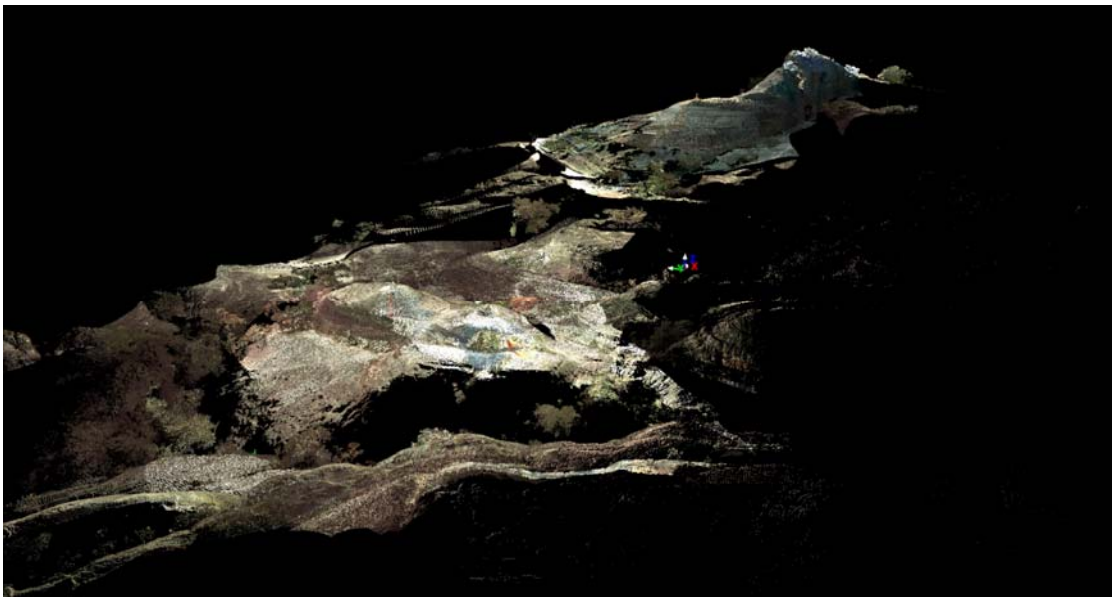


Figura 4-25 – Nuvem de pontos registrada das duas aquisições sem tratamento, apresentando como textura a imagem obtida com a câmera integrada do *Laser Scanner*.

Após alcançar o registro com a qualidade mínima planejada, a nuvem de ponto passa por um tratamento onde são excluídos os pontos desnecessários. É uma tarefa demorada, que requer criatividade e domínio das ferramentas por parte do operador. A figura 4-26 mostra uma das diversas possibilidades de tratamento que a nuvem poderia ter sofrido.



Figura 4-26 – Nuvem de pontos registrada das duas aquisições com tratamento, apresentando como textura a imagem obtida com o *Laser Scanner*.

O produto final, mostrado na figura 4-26, é composto por 17.888.478 pontos. A fase seguinte consiste em exportar no formato de pontos com coordenadas e atributo da refletância (XYZ) para ser, posteriormente, importado pelo GOCAD na fase de modelagem. Entretanto, outros produtos poderiam ter sido produzidos tais como: interpretação sobre a nuvem de pontos; criação de *mesh* (malha); *drape*¹⁴; geração e cálculo de superfícies ou volumes; medida de dimensões; geração de desenhos 2D a partir de modelos 3D; e outros.

4.3.2.2 Processamento das aquisições com GPR

O objetivo do processamento é corrigir a imagem do radargrama reposicionando o sinal original, ressaltando os sinais de interesse, e minimizando ruídos. É uma fase realizada em laboratório, embora comece em campo como controle de qualidade preliminar. Não corrige uma aquisição deficiente, sendo um engano economizar na permanência em campo buscando a recuperação com processamento (Bristow & Jol, 2003).

O maior investimento deve ser na fase de aquisição, embora seja importante considerar o processamento e reprocessamento dos dados, observando os efeitos sob diversos parâmetros. Bristow & Jol (2003) argumentam ainda que o perfis GPR requerer muito pouco processamento para interpretações de geometrias e estruturas sedimentares, embora haja considerável quantidade de técnicas e *software* disponíveis para uso com GPR.

¹⁴ Colocar uma fotografia digital obtida com câmara fotográfica externa, sobre a nuvem de pontos.

Na etapa de campo, foram adquiridos 38 perfis, incluindo avaliações, CMP, perfis válidos, e perfis descartados. Foram selecionados 2 perfis para análise de velocidade, e 6 para processamento.

O processamento dos perfis GPR adquiridos constou das seguintes etapas:

- Preparação dos dados;
- Processamento básico; e
- Interpretação geológica;

A fase de preparação dos dados consiste em: recuperar os perfis da console do SIR-3000 e documentação de campo; providenciar cópia da documentação e backup dos arquivos de aquisição; Recuperar os cabeçalhos; visualizar os arquivos como controle de qualidade inicial; e selecionar os arquivos para processamento. Para a execução da tarefa são utilizadas ferramentas nativas do sistema operacional e o *software* RADAN versão 6.5.

A análise de velocidade precede ao processamento, tendo sido utilizada a ferramenta *Velocity Analysis* do RADAN. Utiliza como entrada os arquivos de aquisição (extensão .dzt) e de velocidade (extensão .vlc). A configuração da ferramenta consta de: distância inicial das antenas; distância de separação das antenas a cada passo; tipo de análise (adotado *Stacked Amplitude*); e posição do zero-offset (adotado automático). Como confirmação, foi aplicado um segundo método utilizando a ferramenta *Migration*, tendo sido obtida a velocidade média de 0,0121 m/ns.

A fase de processamento básico foi realizada no *software* RADAN versão 6.5. Seu ambiente de processamento é mostrado na figura 4-28. Todos os perfis GPR selecionados foram submetidos ao mesmo fluxo de processamento descrito a seguir. O fluxo adotado é resultado de avaliação de fluxos de processamento propostos por (Annan, 2001); (Bristow & Jol, 2003); (Fisher et al., 1992); e (GSSI, 2005) complementado pela experiência obtida com a aquisição e processamento deste e de outros trabalhos.

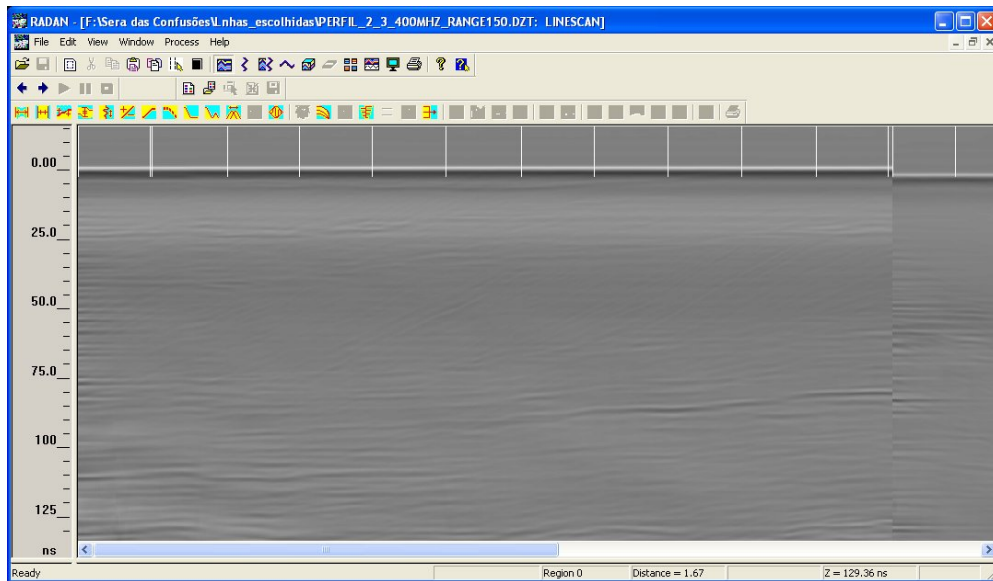


Figura 4-27 – Ambiente do RADAN para processamento de perfis GPR.

A primeira tarefa do processamento básico consiste em ajustar a posição da superfície (*zero-offset*), ou seja, da marca do tempo zero. Essa defasagem causa erro de posicionamento dos refletores, é diretamente proporcional ao afastamento entre as antenas transmissora e receptora. A correção utilizou a ferramenta *Position Correction*, que alinha a primeira quebra dos traços do radargrama ao tempo zero na escala.

A segunda providência é a correção estática. Visa corrigir desalinhamento em tempo entre traços próximos, provocado por saltos da antenna e/ou terreno irregular durante a aquisição. No radargrama ocorre na sua porção superior, aparentando pequenas irregularidades da superfície. A correção é realizada deslocando linearmente, para cima ou para baixo, os traços com a anomalia. Os traços vizinhos são utilizados como referência. Utiliza-se a ferramenta *Static Correction* do RADAN para a correção.

A faixa inferior da banda do sinal emitido pelo GPR possui componentes que não se propagam, mas ao contrário da janela do GPR se difundem no meio geológico (WOW). Sua amplitude decai lentamente com o tempo. Como consequência, no radargrama esse fenômeno causa zona enevoadada e difusa que satura toda a seção. A solução é um filtro do tipo passa alto, que atenua os sinais com frequência muito baixa. Esse fenômeno pode ser corrigido (DEWOW) com a remoção da amplitude média entre traços. Com o RADAN utiliza-se a ferramenta *FIR Filters (Finite impulse Response)*.

Outro ruído que "contamina" o registro do GPR ocorre devido à indução eletromagnética entre as antenas de emissão e recepção. São sinais de alta amplitude e baixa frequência, ocorrendo a poucos comprimentos de onda da fonte. São percebidos em toda extensão do radargrama em sua porção superior. Tem o aspecto de linhas paralelas próximo à superfície. É reconhecido também nos radargramas como onda aérea. Por esse aspecto, quase sem atenuação, possui amplitude maior que os sinais refletidos na região mais rasa da subsuperfície, mascarando estes. Não é incomum reverberar por toda a seção. A correção é realizada na faixa de ocorrência (janela de tempo, de amostra), calculando a média da amplitude dos traços do radargrama e subtraindo essa média do traço original. Esse processo é genericamente conhecido como *background removal* ou *subtracting average*. No RADAN, a correção pode ser realizada utilizando-se a ferramenta *FIR Filters*, configurando *Horizontal Filter*.

A correção dos efeitos de propagação impacta positivamente na qualidade da imagem do radargrama GPR (Xavier Neto & Medeiros, 2005). *SEC (Spherical and Exponential gain Compensation)* foi a técnica de correção empregada, implicando um ganho linear crescente conjugado com um aumento exponencial. O ganho compensa a perda pelo espalhamento esférico e a dissipação exponencial da energia (Bristow & Jol, 2003). No RADAN, a ferramenta *Range Gain* foi empregada para correção.

A antena do GPR emite energia eletromagnética que se propaga na forma de um cone esférico de energia em expansão (Annan, 2001). Nesse espalhamento geométrico há um decréscimo na amplitude do sinal, ocasionado pela frente de onda¹⁵, e a energia decresce com o quadrado da distância da fonte emissora (Neal, 2004). Essa conceitual superfície esférica possui uma área denominada *GPR footprint* (figura 4-29), traduzido como "pegada do GPR", mais precisamente zonas de Fresnel (Xavier Neto & Medeiros, 2005). Objetos com dimensões finitas em relação à frente de onda (pegada) podem aparecer como refletores hiperbólicos no radargrama. Refletores mais profundos podem ser sobrepostos pelas hipérbolas. Superfícies com mergulho acentuado também podem causar reflexões difratadas, podendo provocar interpretação errônea das dimensões e geometrias dos objetos em subsuperfície. Migração é uma técnica que mitiga esses dois problemas, movendo os refletores com mergulho acentuado para a posição correta, colapsando as difrações hiperbólicas. O RADAN disponibiliza a ferramenta *Migration* para realizar essas correções.

¹⁵ Frente de onda são superfícies com igual tempo de deslocamento ou fase considerando a fonte de emissão.

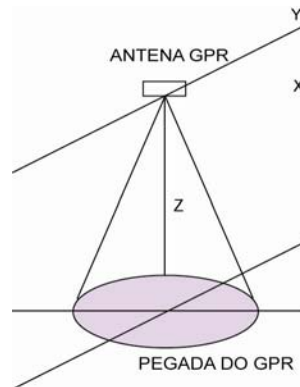


Figura 4-28 – Ilustração da propagação de energia eletromagnética e do fenômeno GPR *footprint*.

A etapa final do processamento corresponde à correção topográfica. Na aquisição GPR, o dado bruto é gravado considerando a superfície como horizontal. Dessa forma, refletores aparentam mergulhos e curvaturas incorretos. O posicionamento correto consiste em deslocar verticalmente cada traço segundo a topografia de aquisição. No RADAN, esse processo consiste em atualizar a tabela *Marker Table*.

A interpretação geológica de radargramas vai orientar a modelagem de fácies do modelo estático digital 3D e, conseqüentemente, fornecer geometrias deposicionais que serão utilizados nos sistemas de simulação de reservatórios. Esta fase é pessoal e depende da experiência do operador, sendo a fase mais subjetiva da metodologia GPR, a qual requer do profissional disposição investigativa e conhecimento geológico. É recomendável que o profissional interpretador esteja presente na aquisição e que seja realizado, ainda em campo, um reconhecimento geológico detalhado que permitirá a aferição dos refletores e a identificação do seu significado geológico.

Os radargramas selecionados estão apresentados nas figuras 4-30, 4-31, e 4-32. No anexo 4 deste documento, encontram-se impressões dos mesmos radargramas, em maior formato, permitindo assim uma melhor visualização dos refletores. Os radargramas foram exportados (formato bmp) para o *software* Corel Draw, em escala, para sua interpretação geológica.

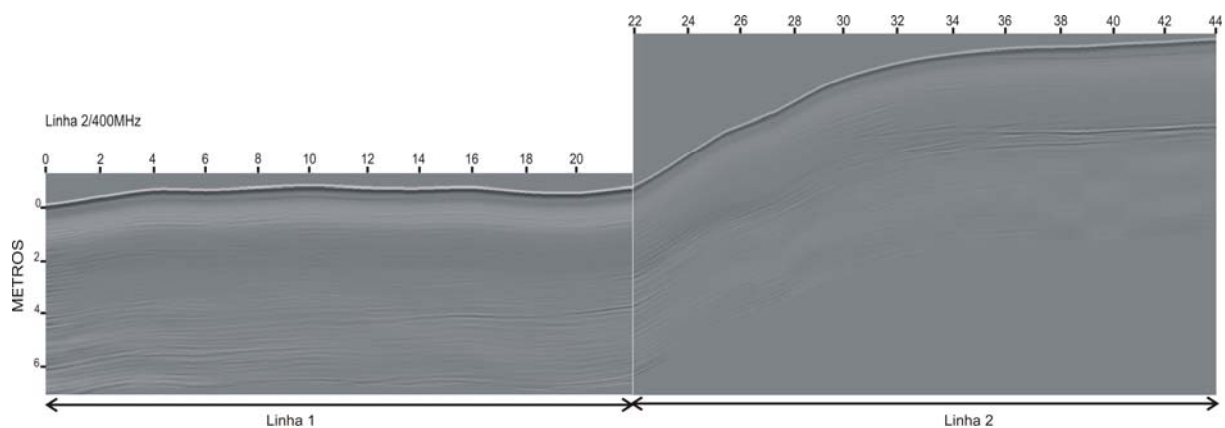


Figura 4-29 – Radargrama das linhas 1 e 2 com antena de 400 MHz. Notar a profundidade de investigação de até 7m.

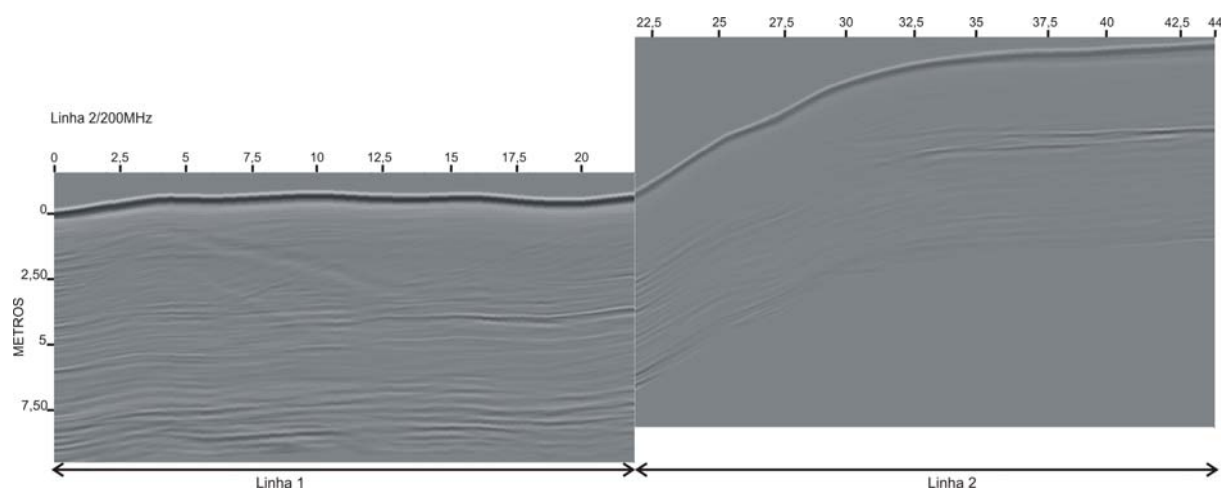


Figura 4-30 – Radargrama linhas 1 e 2 com antena de 200 MHz. Notar a profundidade de investigação de até 14m.

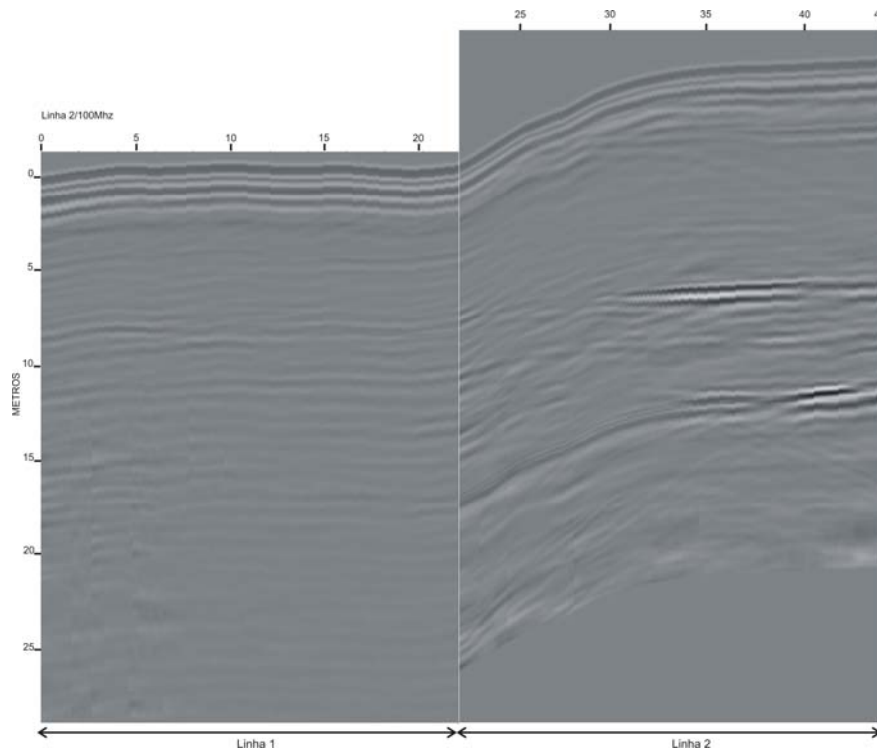


Figura 4-31 – Radargrama das linhas 1 e 2 com antena de 100 MHz. Observar a profundidade de investigação de aproximadamente 28m.

O principal objetivo do levantamento geofísico com o GPR foi avaliar a aplicabilidade desta ferramenta, nas rochas encontradas na Serra das Confusões, principalmente para a identificação das geometrias e superfícies limitantes proposta por Miall (1985, 1988 e 1996). Este autor introduziu também o conceito de Elementos Arquiteturais (EA) para sistemas fluviais mas que pode ser estendido para outros sistemas deposicionais. Os EA são definidos como uma componente de um sistema deposicional equivalente em tamanho a/ou menor que um “depósito de preenchimento de canal” e maior que uma unidade de fácies individual, caracterizado por uma distintiva associação de fácies, geometria interna e forma externa, empilhamento vertical e as superfícies limitantes (Miall, 1996). Na proposta de hierarquização dos elementos arquiteturais, Miall (1988) propôs as chamadas superfícies limitantes e classificou-as em seis diferentes ordens, sendo estas caracterizadas por: 1^a ordem – Um limite de *set* que apresenta pouca ou nenhuma erosão interna e não corta estratificações anteriores. São interpretadas como resultado das migrações das formas de leitos sob um regime de fluxo constante; 2^a ordem - Superfícies limitadas por *coset*. São geralmente erosionais, mas sem significante parada no tempo; são interpretadas como resultado de uma mudança nas condições ou direção de fluxo; 3^a ordem – São superfícies de truncamentos erosionais dentro de macroformas que possuem mergulhos de baixo ângulo (normalmente < 15°), identificados por superfícies de reativação; 4^a ordem – Representam as maiores superfícies limitantes de macroformas; 5^a ordem – Superfícies limitantes que separam complexos de canais e lençóis

de areias; e 6^a ordem – Define grupos de canais ou paleovales, mapeadas como unidades estratigráficas.

Desta forma, o levantamento geofísico com o GPR mostrou, com diferentes antenas (400 MHz, 200 MHz, 100 MHz) um panorama razoável das geometrias deposicionais internas (heterogeneidades) dos afloramentos estudados, em especial das superfícies limitantes. A profundidade de observação variou entre 7 m com a antena de 400 MHz e 28 m com a antena de 100 MHz. Como os afloramentos imageados estavam desprovidos de solo e vegetação foi possível correlacionar os refletores obtidos nos radargramas com as respectivas superfícies limitantes interpretadas também nas fotografias e fotomontagens.

Como esperado, as antenas de 400 MHz e 200 MHz se mostraram adequadas, até 7 m e 10 m de profundidade, respectivamente, para imagear tanto as superfícies limitantes quanto as estruturas sedimentares (figuras 4-30 e 4-31). Já com a antena de 100 MHz (figura 4-32), como previsto, o imageamento das estratificações cruzadas fica prejudicado pela incapacidade (acurácia) resultante do comprimento de onda desta antena. Entretanto, as superfícies limitantes de 2^a ordem foram identificadas com segurança até 10 m.

É digno de nota as semelhanças observadas entre as interpretações obtidas nas fotografias/fotomontagens e nos radargramas, em afloramentos com boa exposição (sem solo e vegetação). Com as fotografias, é possível imagear os afloramentos em diferentes ângulos, permitindo a visualização dos planos das estratificações ou das geometrias das camadas em variados cortes, evidenciando, desta forma, a geometria interna, em meso escala, dos depósitos estudados. Parte destas geometrias foi também claramente imageada nos radargramas, em especial as superfícies limitantes. Com as antenas de 400 MHz e 200 MHz, foram identificadas tanto as superfícies limitantes de 1^a e 2^a ordens quanto as estratificações cruzadas. É muito boa também a correlação encontrada entre os refletores identificados nos radargramas destas antenas e as superfícies limitantes interpretadas nos fotomosaicos (figuras 4-33 e 4-34).

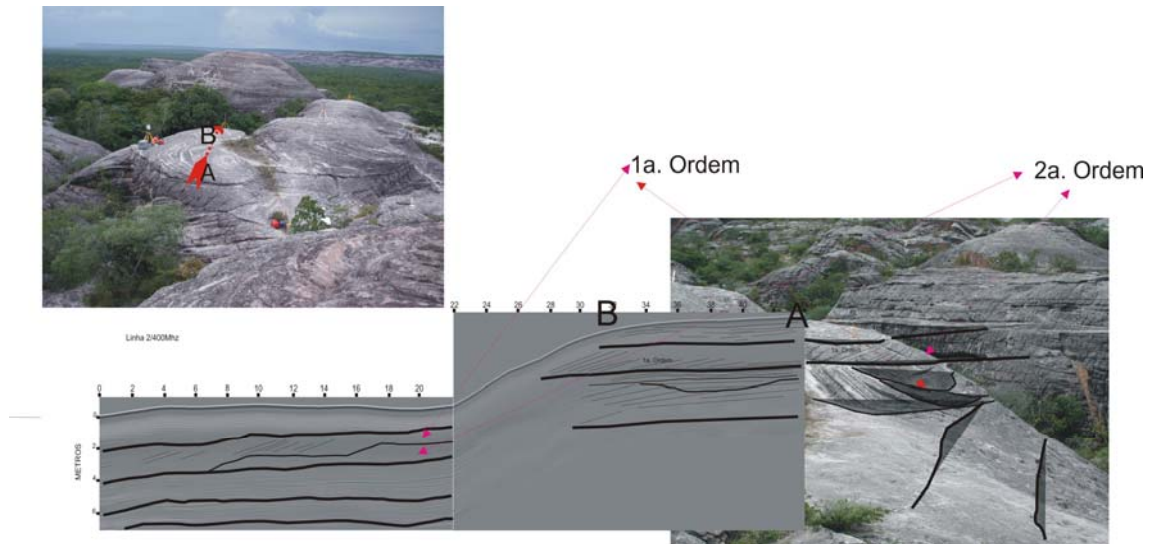


Figura 4-32 – Ilustração composta por fotografia sobreposta por radargrama obtido com antena de 400 MHz, interpretada das linhas 1 e 2. Destaque para as superfícies limitantes de 1ª e 2ª ordens. Na porção superior esquerda é apresentada uma vista geral da área imageada com a direção de aquisição.

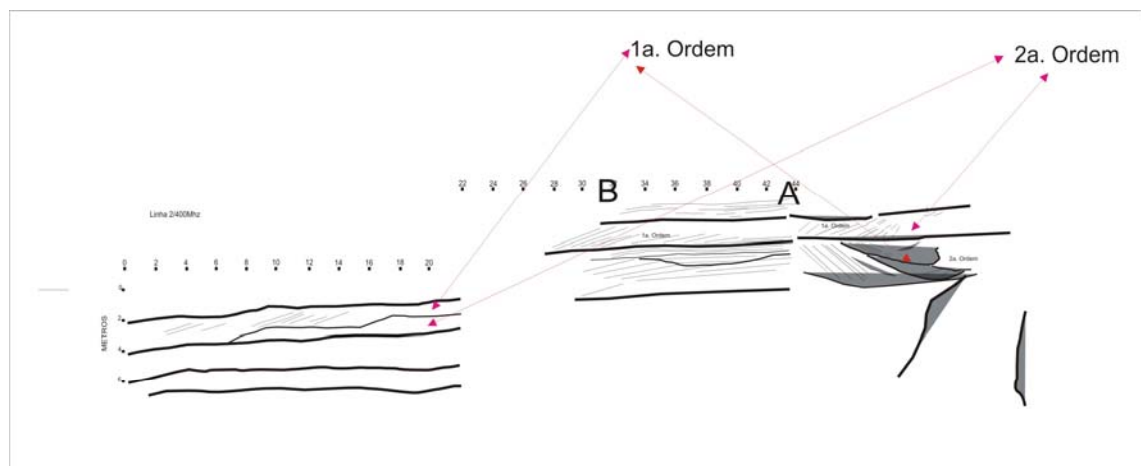


Figura 4-33 – Ilustração da interpretação dos radargramas e fotomosaico apresentada na figura 4-32.

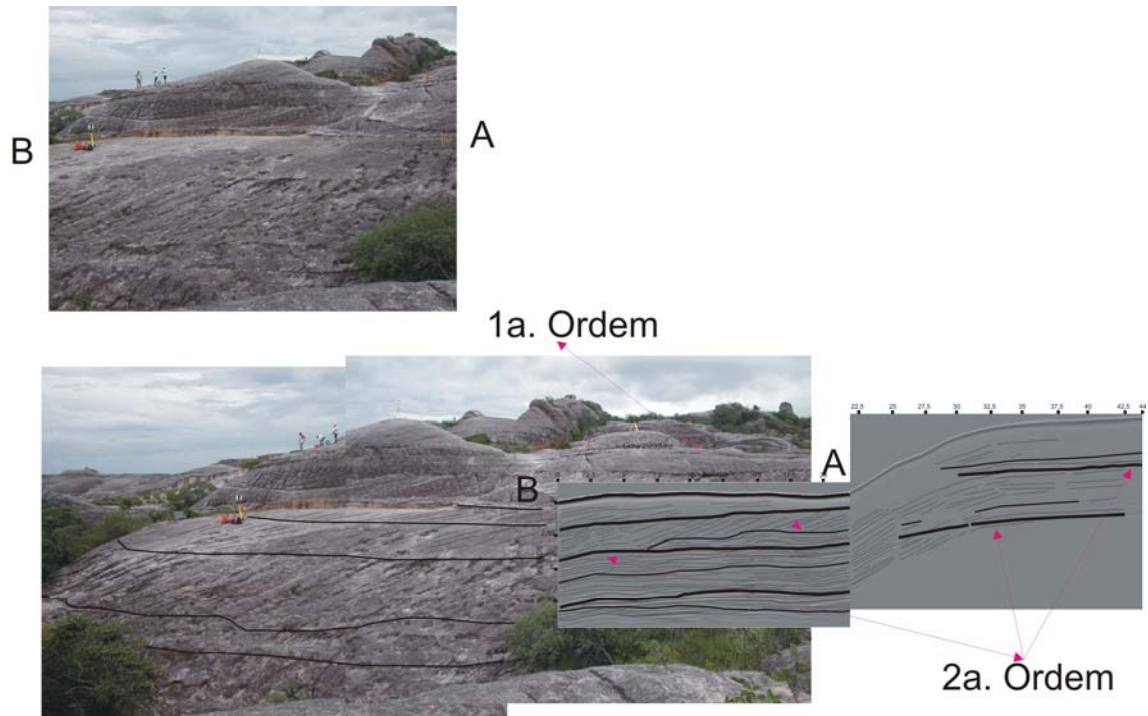


Figura 4-34 Ilustração composta por fotografia sobreposta por radargrama obtido com antena de 200 MHz interpretados, das linhas 1 e 2 das linhas 1 e 2. Destaque para as superfícies limitantes de 1ª e 2ª ordens. Na porção superior esquerda é indicada a direção da aquisição.

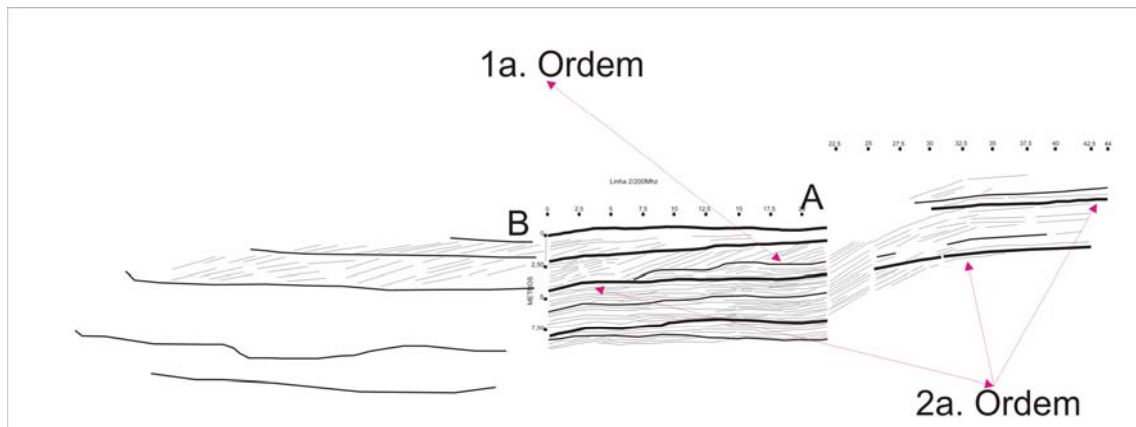


Figura 4-35 Ilustração da interpretação dos radargramas e fotomosaico apresentada na figura 4-34.

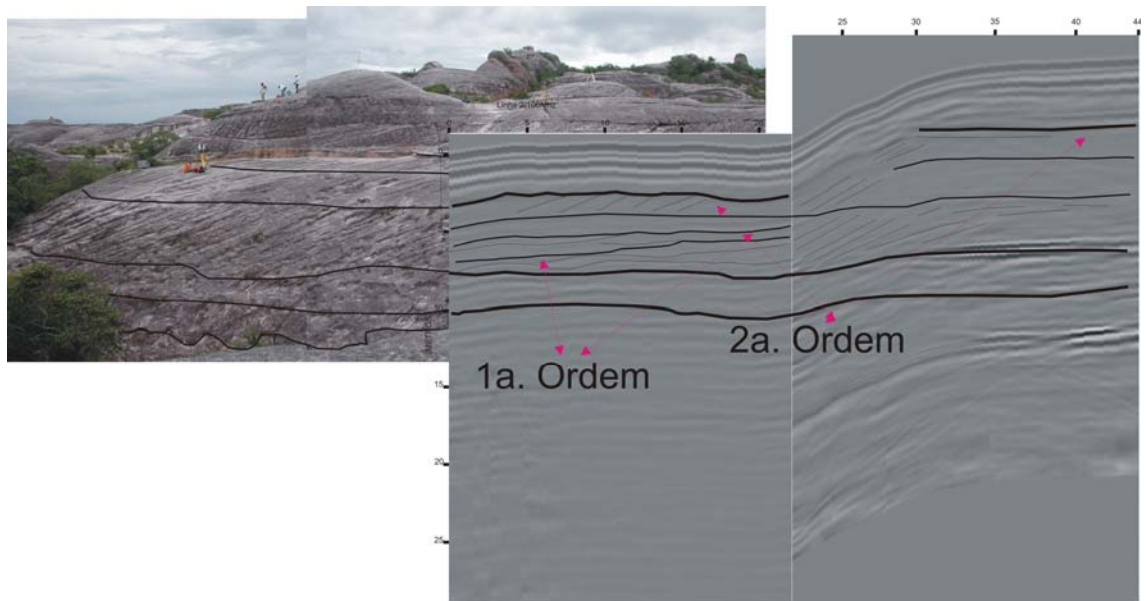


Figura 4-36 Ilustração composta por fotografia sobreposta por radargrama obtido com antena de 100 MHz, interpretados, das linhas 1 e 2. Destaque para as superfícies limitantes de 1ª e 2ª ordens.



Figura 4-37 Ilustração da interpretação dos radargramas e fotomosaico apresentada na figura 4-36.

4.3.3 Modelagem estática 3D

O GOCAD é composto por módulos que permitem visualizar diferentes tipos de dados, como pontos, linhas, superfícies, e volumes (GOCAD, 2004). As entidades tridimensionais que podem ser representadas são:

- *Point Set*: conjunto de pontos (*atoms*) que não guardam relações entre si;
- *Curve*: segmentos, formado pela conexão entre dois pontos, interconectados ou não;
- *Surface*: malha triangular;

- *Voxel*: malha regular tridimensional constituída por elementos volumétricos denominados *Voxels*.
- *Sgrid*: conjunto de dados estratigráficos. Um *Sgrid* é mais sofisticado que um *Voxel* porque o usuário pode adaptar os limites deste a superfícies tridimensionais e particioná-lo ao longo de superfícies de falha.
- *Gshape*: este objeto é definido por uma linha poligonal atravessada por seções posicionadas ao longo desta. Utiliza-se esta entidade para representar estruturas longas e meandranes, tais como canais.
- *Well*: poço. Este objeto engloba informações geométricas e geológicas associadas a poços.

Diversas ferramentas do GOCAD são necessárias para consolidar os dados e produzir o modelo 3D. Inicialmente, deve ser importado os dados do tipo ponto ou conjunto de pontos para objetos *PointSets*. Em seguida são importadas linhas para objetos *Curves*. O etapa seguinte é criar as superfícies como objetos *surfaces* a partir da interpolação de pontos e curvas. Posteriormente, devem ser importadas imagens como objetos *voxels* georreferenciados. Também podem ser importados radargramas no formato SEG-Y para objetos *surface*. Finalmente, deve ser produzida a interpretação necessária em ambiente 3D.

Para esse trabalho, a nuvem de pontos foi importada como arquivo padrão XYZ mapeado para objeto *PointSet*. Foi utilizada a ferramenta *column based file* para a tarefa. Foram importados 7.139.764 pontos. O software GOCAD não apresentou a mesma flexibilidade de visualização do software Cyclone, apresentando lentidão excessiva, a qual exigiu a redução do número de pontos do objeto obtido com a importação. Após diversos testes, obteve-se uma superfície decimada (redução do número de triângulos) com pouco mais de 700.000 pontos (figura 4-38).

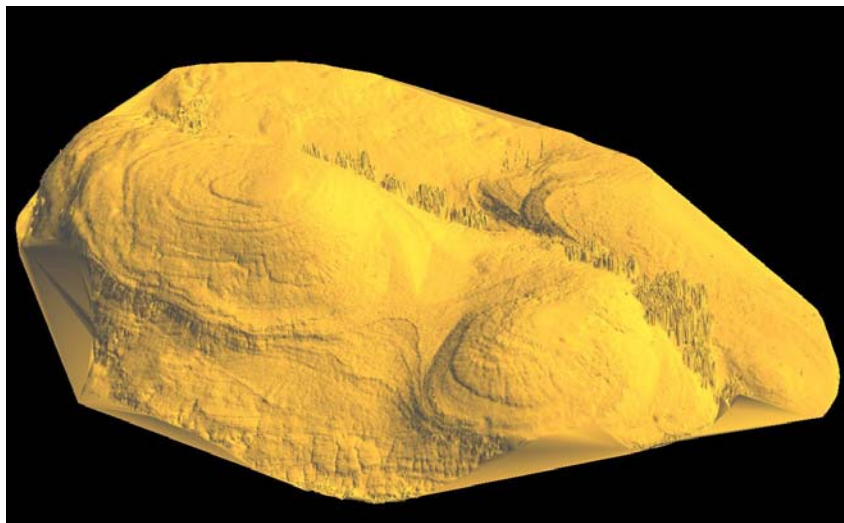


Figura 4-38 Superfície decimada da nuvem de pontos.

Para demonstrar a metodologia, o radargrama dos perfis das linhas 1 e 2 (figura 4-31) foi anexado à superfície decimada. Para isso, inicialmente, foi construída uma superfície sobre a qual a figura do radargrama será sobreposta. Essa superfície foi construída tendo como base a linha que contém os pontos da superfície que correspondem ao perfil do levantamento do GPR (figura 4-39).

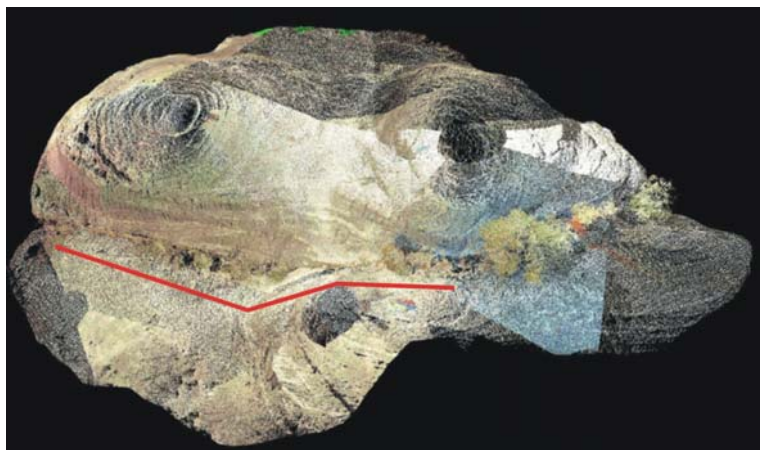


Figura 4-39 Localização do perfil GPR em relação à nuvem de pontos.

A figura do radargrama foi importada como *Voxel (grid regular)*, utilizando a ferramenta: *File/Import Objects/Images/as 2D voxel*. Em seguida, foram ajustadas as coordenadas da imagem usando *Voxel mode (General -> Voxel): Edit/Resize with Points*. Onde *point_u*, *point_v*, e *point_w* são as extremidades dos eixos vermelho, verde e azul do voxel da imagem. Finalmente, nos atributos da superfície, na aba *texture*, usar a opção *draping* com o *voxel* da imagem. O resultado da operação pode ser visualizado na figura 4-40.

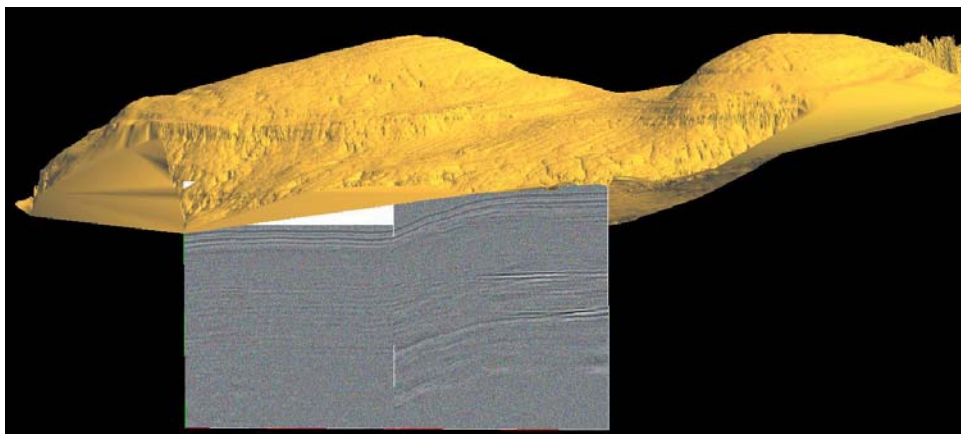


Figura 4-40 Radargrama agregado à superfície decimada.

Este trabalho observou que a ferramenta GOCAD apresenta um desempenho menor que o *software* Cyclone na tarefa de interpretação. O ambiente mostrou-se pesado na

movimentação da nuvem de pontos, ao contrário do Cyclone. Por esse motivo, a interpretação das superfícies limitantes identificadas na nuvem de pontos fossem realizada no software Cyclone. A interpretação dos refletores que representam a geometria interna do afloramento foi realizada no software Corel Draw, e importada para o GOCAD como figura utilizando o mesmo processo da integração do radargrama. A etapa seguinte consistiu em digitalizar as interpretações gerando objetos *Curves*. A correlação lateral de objetos *Curve* permite determinar superfícies 3D que representam a interpretação geológica das geometrias interna e externa do afloramento. O produto final tem potencial para ser exportado pelo GOCAD para visualização em ambiente imersivo.

Esse capítulo procurou descrever de forma detalhada o processo de modelagem de afloramentos com o objetivo de orientar, no futuro, profissionais em trabalhos semelhantes.

Capítulo V

Resultados e discussões

5 Resultados e discussões

Esta dissertação mostrou a aplicação dos modelos estáticos virtuais 3D, como o mais recente paradigma no estudo de afloramentos, com o potencial de integrar, de forma consistente, dados plani-altimétricos, geofísicos, e produtos de sensoriamento remoto, permitindo a validação de interpretações 2D contra o espaço 3D, visualização de geometrias deposicionais complexas, inclusive em ambiente de realidade virtual imersivo.

O estudo de caso apresentado demonstrou que a metodologia proposta é eficiente na construção de modelos estáticos virtuais 3D de afloramentos análogos a reservatórios petrolíferos de forma sistematizada, abrindo espaço para o imageamento digital 3D em larga escala de áreas expostas, sem ou com pouco solo/vegetação, com significativa importância geológica. Demonstrou ainda como dispor no mesmo sistema de coordenadas aquisições espacialmente distantes e sem interseção, obtidas em momento diferentes. Quando associados, estes dois fatos abrem caminho para a construção de banco de dados de objetos 3D georreferenciados, que organizados e visualizados simultaneamente no mesmo espaço podem permitir correlações geológicas antes não percebidas. Essa possibilidade pode ser estendida para a criação de viagens virtuais, excelente ferramenta educacional.

Foi demonstrado que a nuvem de pontos, produto do *Laser Scanner*, pode ser utilizada como arcabouço de integração e coerência para outros levantamentos que possam ser modelados como geoobjetos. A metodologia proposta para aquisição com *Laser Scanner* demonstrou, através do estudo de caso, que os erros envolvidos na modelagem são desprezíveis quando comparados com as dimensões das geometrias deposicionais em macro e meso escalas.

As aquisições GPR com as antenas de 400, 200, e 100 MHz se mostraram adequadas para imagear as heterogeneidades em macro e mega escalas dos arenitos das Serra das Confusões, modelando de forma coerente as superfícies limitantes. Dessa forma, o produto do GPR quando integrado, no mesmo espaço, ao sólido 3D (modelo estático) adquirido com *Laser Scanner* (superfície externa), representam realisticamente o afloramento estudado.

Capítulo V

Conclusão

6 Conclusão

Modelos estáticos virtuais 3D de afloramentos análogos a reservatório petrolíferos são recursos indispensáveis no estudo, planejamento, e desenvolvimento de reservatórios petrolíferos, por diminuírem as incertezas do espaço interpoços, fornecendo geometrias deposicionais ou deformacionais reais em diversas escalas. Esses dados são utilizados como restrições impostas na simulação de modelos de reservatórios petrolíferos.

Para construir modelos estáticos virtuais 3D de afloramentos, se faz necessário determinar sua superfície externa e estruturas internas. Para essa tarefa, as tecnologias LIDAR e GEORADAR são as mais recentes e indicadas, por apresentarem acurácia, produtividade, mobilidade, e simplicidade no uso.

Este trabalho propõe uma metodologia de construção de modelos estáticos virtuais 3D de afloramento análogos a reservatórios de petróleo, com potencial para fornecer dados de geometrias deposicionais ou deformacionais em diferentes escalas de observação, úteis como restrição na simulação de reservatórios petrolíferos, como também na tomada de decisões gerenciais.

A metodologia é apresentada através de um estudo de caso, com aquisições de afloramento em área localizada na borda sudeste da Bacia do Parnaíba, no Parque Nacional da Serra das Confusões. O estudo de caso demonstra que a metodologia possui potencial de utilização na indústria de petróleo.

Referências Bibliográficas

ALBA, M.; LONGONI, L.; PAPINI, M.; RONCORONI, F.; SCAIONI, M. Feasibility and problems of TLS in modeling rock faces for hazard mapping. Politecnico di Milano. ISPRS WG III/3 III/4 V/3 Workshop Laser scanning 2005. Netherlands, 2005.

ANNAN, A.P. GPR – History, Trends, and Future Developments. Subsurface Technologies and Applications, Vol.3, n 4, Sensors & Software Inc., Canada, 2002

ANNAN, A.P. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Canada: Sensors & Software, 2001.

ANNAN, A.P.; DAVIS, J.L. Ground Penetrating Radar – Coming of age at last!! In: “proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration”, A.G. Gubins, 1997, p.515-522.

ANGELOPOULOU, Elli; WRIGHT JR; JOHN R. Laser Scanner Technology. Technical Reports (CIS), Department of Computer & Information Science University of Pennsylvania, 1999. Disponível em: <http://repository.upenn.edu/cis-reportsw/74> Acesso em: 20 jul 2007.

APEL, Marcus. Introduction to Geomodelling. GOCAD. TU Freiberg, 2005. In: www.geo.tu-freiberg.de/~apelm-geomodeling at TU Freiberg. Acesso em: 20 de fev 2008.

BAE, Kwang-Ho; LICHTI, Derek D. A method for automated registration of unorganised point clouds. ISPRS Journal of photogrammetry & Remote Sensing. 2007. (Article in press, available in 10/11/2007 at www.sciencedirect.com).

BELLIAN, J. A.; KERANA, C.; JENNETTE, D. C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning LIDAR technology in stratigraphic modeling. Journal of sedimentary research, v.75, n.2, p.166-176, 2005.

BERES, Milan; HUGGENBERGER, Peter; GREEN, Alan; HORSTMAYER, Heinrich. Using two- and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. Sedimentary Geology n.129 p.1–24, 1999.

BOEHLER, Wolfgang; MARBS, Andréas. Investigating Laser Scanner Accuracy. I3mainz. Unstitute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz University of Applied Sciences, Mainz, Germany, 2003. Disponível em: www-group.slac.stanford.edu/met/align/Laser_Scanner/laserscanner_accuracy.pdf Acesso em: 12 mar 2007.

BOTELHO, Macos A. B.; MACHADO, Sandro L.; DOURADO, Tiago C.; AMPARO, Nelson S. Experimentos laboratoriais com GPR (1 GHz) em corpos arenosos para analisar a influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação. Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003.

BRISTOW; Charlie S.; JOL, Harry M. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. Geological Society, London, Special Publications, 211, 9-27, 2003.

BUCKLEY, S. J.; HOWELL, J. A.; ENGE, H. D.; LEREN, B. L. S. KURZ, T. H. Integration of terrestrial laser scanning, digital photogrammetry and geostatistical methods for high-resolution modeling of geological outcrops. Centre for integrated petroleum research, University of Bergen, Norway, 2006.

CAUSSE, Emmanuel; SÉNÉCHAL, Pascale. Model-based automatic dense velocity analysis of GPR field data for the estimation of soil properties. Journal of Geophysics and Engineering. Nanjing Institute of Geophysical Prospecting, 3, 169-176, UK, 2006.

CASTRO, David L.; CARVALHO, Alexandre M.; CASTELO BRANCO, Raimundo Mariano G. Uso do GPR no estudo da estruturação interna de depósitos de eolianitos na região costeira de Uruoca – CE. Revista de Geologia, Vol. 19, nº 1, 129-138, 2006.

CORBEANU, Rucsandra; SOEGAARD, Kristian; SZERBIAK, Robert; THURMOND, John; McMECHAN, George; WANG, Deming; SNELGROVE, Steven; FORSTER, Craig; MENITOVE, Ari. Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D ground-penetrating radar: Example from the middle cretaceous ferron sandstone, east-central Utah. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 85, 1583-1608, 2001.

CYCLONE - HDS SCANNING & CYCLONE TRAINING MANUAL. San Ramon, California/EUA: Leica Geosystems HDS, Inc.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A.P. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of oil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 37, 531-551, 1989.

ELKHRACHY, Ismail; NIEMEIER, Wolfgang. Optimization and strength aspects for georeferencing data with terrestrial laser scanner system. 12th FIG Symposium, Baden, may 2006. Disponível em: www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/LS1/Elkhrachy.pdf Acesso em: 25 abr 2007.

FISHER, Steven C.; STEWART, Robert R.; JOL, Harry M. Processing ground penetrating radar (GPR) data. CREWES Research Report, v.4, 1-11, 1992.

FLORENCIO C. P.; SILVA, J.G.F.; ROCHA, V. A., LIMA FILHO, F. P.; MENEZES, L.; FREIRE, R.C. Modelagem 3D de Alta Resolução com Uso do Laser Scanner no Estudo de Afloramentos Análogos A Reservatórios: Exemplo de Aplicação na Bacia Potiguar. In: II Simpósio de Sedimentologia e Estratigrafia. p. 78-79, 2004.

FREIRE R.C. Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR. UFRN/PPGG, Natal, Dissertação de mestrado, 89p. 2006.

FREIRE, R. C.; MENEZES, L.; PEREZ, Y. A. R.; LIMA FILHO F. P. O uso do software GoCAD para geração de modelos determinísticos de afloramentos análogos. In: 42 Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá - MG, 2004.

FREIRE, R.C. Modelagem 3D da Jazida de Itaitaia – CE. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Ceara. 157p, 2004.

GAUW D.S., MENEZES L., Reyes-Pérez Y.A., FREIRE R.C., MOURA, M.V.M., SOUSA, A.M., ARAÚJO, V.D., SANTOS, D. A. S., LIMA-FILHO, F.P. Nova metodologia para aquisição de geometrias (interna e externa) de depósitos fluviais recentes e modelagem determinística 3D: Exemplo do rio Assu. *Revista de Geologia (UFC)*, **18**: (2)165-176. 2005.

GOCAD - INTRODUCTION TO BASE MODULE EARTH DECISION SUITE 2.1. Houston: Earth Decision Sciences, 2004.

GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, M. Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurement. California, USA, p. 23-32, 2001.

GRINGARTEN, Emmanuel. Uncertainty Assessment in 3D Reservoir Modeling: an Integrated Approach. Earth Decision Sciences. Disponível em: www.t-surf.com/newwhite_papers/AssessingUncertaintythru3DResModeling.pdf. Acesso em 13 dez 2007.

GSSI - GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS INC. RADAN 6.5 user's manual. 2 ed. United States/New Hampshire: GSI, 2005.

GSSI - GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS INC. Terrasirch SIR System – 3000 User's Manual. United States/New Hampshire: GSSI, 2004.

LASER SCANNER CYRAX HDS 3000 - Especificações – Disponível em: <http://hds.leicageosystems.com/> Acesso em 25 abr 2007.

JACOBS, Geoff. Registration and Geo-referencing. http://www.ingentaconnect.com/content/geol/pg/2000/00000006/00000003/art00001-aff_1 Professional Surveyor Magazine. Estados Unidos, julho, p 30-37, 2005.

JONES, R. R.; McCAFFREY, K. J. W.; CLEGG, P.; WILSON, R. W.; HOLLIMAN, N. S.; HOLDSWORTH, R. E.; IMBER, J.; WAGGOTT, S. Integration of regional to outcrop digital data: 3D visualization of multi-scale geological models. Disponível em: http://www.dur.ac.uk/r.r.jones/Downloads/C&G2008_Jones_etal_Vis_Multi-scale_Models.pdf. Acesso em 20 jan 2008.

KEOGH, Kevin Joseph; MARTINIUS, Allard Willem; OSLAND, Rune. The development of fluvial stochastic modeling in the Norwegian oil industry: A historical review, subsurface implementation and future directions. *Sedimentary Geology*. 202, pp 249-268, 2007. Disponível em: www.sciencedirect.com Acesso em 08 nov 2007.

LUTZ, P.; GARAMBOIS, S.; PERROUD, H. Influence of antenna configurations for GPR survey: information from polarization and amplitude versus offset measurements. In: *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Edited by Bristow, C.S; Jol, H.M. Geological Society, London, Special Publications, 211, 299-313, 2003.

McMECHAN, George A.; GAYNOR, Gerard C.; SZERBIAK, Robert B. Use of ground-penetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoir analogs. *Geophysics*, v.62, N. 3 p. 786–796, 10 FIGS, 1997.

MENEZES, L. Mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos: exemplo para depósitos fluviais da unidade Açú-3 - Bacia Potiguar. UFRN/PPGG, Dissertação de mestrado, 118p. 2004.

MIALL, A.D. Architectural element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Review*, 22 :261-308, 1985.

MIALL, A.D. Architectural Elements and Bounding Surfaces in Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado. *Sedimentary Geology*, v. 55, p. 233 - 262, 1988.

MIALL, A.D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. Italy, Springer Verlag, 1996, 582p, 1996.

MONICO, J.F.G; Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Unesp, 287 pp. 2000.

NASCIMENTO JÚNIOR, J. O. do.; SCHULER, C. A. B; CAVALCANTE, R. B. de S. Sistema Laser Scanner. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2006, Aracajú. Anais eletrônico:. Aracajú: Instituição, 2006. Disponível em: www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/artigos_pdf/069_t.pdf Acesso em: 08 nov 2007

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

PORSANI, Jorge Luis. Método GPR: aplicações em geologia, geotecnia, meio ambiente e planejamento urbano. Universidade de São Paulo. Instituto Astronômico e Geofísico – Departamento de Geofísica. Versão 2.0, 2001.

PRINGLE, J. K.; HOWELL, J. A.; HODGETTS, D.; WESTERMAN, A. R.; HODGSON, D. M. Virtual Outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art. *EAGE, First break volume 24*, march 2006.

PRINGLE, J. K.; WESTERMAN, A. R.; CLARK, J. D.; DRINKWATER, N. J.; GARDINER, A. R. 3D high-resolution digital models of outcrop analogue study site to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK. *Petroleum Geoscience*, v.10, p.1-11, 2004.

WU, Qiang; XU, Hua; ZOU, Xukai. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. *Computers & Geosciences*, v.31, p.35-43, 2004.

REPERT, Philip M.; MORGAN, F. Dale; TOKSÖZ, M. Nafi. Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients. *Journal of Applied Geophysics*, v.43, p.189-197, 1999.

REYES-PEREZ, Y.A., Lima Filho F.P., Freire R.C., Menezes, L., Sousa, A.M., Moura, M.V.M., Gauw, D.S., Appi, C.J. Geometria interna 3D de depósitos de maré na foz do Rio Parnaíba, nordeste do Brasil. In: *XLII Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá-MG. CD Rom*. 2004.

ROSA, Adalberto José; CARVALHO, Renato de Souza; XAVIER, José Augusto Daniel. Engenharia de reservatórios de petróleo. Rio de Janeiro: Editora Interciência: Petrobras, 2006.

SCAIONI, Marco. direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites. Italia: 2005. Disponível em: www.commission5.isprs.org/3darch05/pdf/23.pdf Acesso em 19 abr 2007.

SENSORS & SOFTWARE INC. Ground Penetrating Radar Survey Design. Canadá: 1999. Disponível em: www.sensoft.on.ca. Acesso em 20 fevereiro de 2008.

SLATT, R. M.; SIYABI, H. A.; VANKIRK, C. W.; WILLIAMS, R. W. From geologic characterization to “Reservoir Simulation” of a turbidite outcrop, Arkansas, U.S.A. SEPM Special Publication 68, pp 187-194, 2000.

SCHUHMACHER, Sara; BÖHM, Jan. Georeferencing of terrestrial laser scanner data for applications in architectural modeling, 2002.

TILLARD, Sylvie; DUBOIS, Jean-Claude. Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination. . Journal of Applied Geophysics, v.33, p.77-91, 1995.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia; Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a curta Distância. Geodésia Online (UFSC). 2004. Disponível em <http://geodesia.ufsc.br/geodesia-online/arquivo/2003/04.1/AT2003.html> Acesso em: 30 mai 2007.

TRINKS, Immo; CLEGG, Phillip; MCCAFFREY, Ken et al.. Mapping and analyzing virtual outcrops. In: www.unm.edu/facstaff/ffw/IMAGES/pdfs/visualgeosciences_it.pdf. Acesso em 20 de fevereiro 2008.

TUREYEN, O. I; KARACALI O; CAERS, Jef. A Parallel, multiscale approach to reservoir modeling. European Conference on the Mathematics of Oil Recovery - Cannes, France, 2004.

VERDEYEN, Joseph Thomas. Laser Electronics. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

WUTKE, Juliana Dias; CENTENO, Jorge Antonio Silva. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varedura a laser terrestre. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 13, nº 1, p 151-164, jan-jun, 2007.

_____. Avaliação da dispersão de dados levantados com Sistemas Laser Scanner Terrestre. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, 2006, p 1-7.

XAVIER NETO, Pedro; MEDEIROS, Walter E. de. A practical approach to correct attenuation effects in GPR data. Journal of Applied Geophysics. Elsevier, V.59, p 140-151, 2005.

ZENG, Xiaoxian; McMECHAN, George; BHATTACHARYA, Janok; AIKEN, Carlos; XU, Xueming; HAMMON, William; CORBEANU, Rucsandra. 3D imaging of a reservoir analogue in point bar deposits in the ferron Sandstone, Utah, using ground-penetration radar. Geophysical Prospecting, 52, p 151-163, 2004.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)