



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA – PPGG

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MAPEAMENTO DIGITAL DE ANÁLOGOS A RESERVATÓRIOS
PETROLÍFEROS: EXEMPLO PARA DEPÓSITOS FLUVIAIS DA
UNIDADE AÇU-3 - BACIA POTIGUAR**

Dissertação N° 42 / PPGG

Autor:

LEONARDO MENEZES

Orientador:

FRANCISCO PINHEIRO LIMA FILHO

Natal - RN, Novembro de 2004

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA – PPGG

PROGRAMA DE FORMAÇÃO EM GEOLOGIA, GEOFÍSICA E INFORMÁTICA NO SETOR
PETRÓLEO E GÁS NA UFRN – PRH22/ANP-MME-MCT



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MAPEAMENTO DIGITAL DE ANÁLOGOS A RESERVATÓRIOS PETROLÍFEROS: EXEMPLO PARA DEPÓSITOS FLUVIAIS DA UNIDADE AÇU-3 - BACIA POTIGUAR

Dissertação de Mestrado apresentada em
31 de Novembro de 2004, para obtenção
do título de Mestre em Geodinâmica pelo
Programa de Pós-Graduação em
Geodinâmica e Geofísica da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte.

Autor:

LEONARDO MENEZES

Comissão Examinadora

PROF. DR. FRANCISCO PINHEIRO LIMA FILHO (DG/PPGG/UFRN - ORIENTADOR)

DR. CIRO JORGE APPI (CENPES/PETROBRAS)

PROF.^A. DR.^A. VALÉRIA CENTURION CÓRDOBA (DG/PPGG/UFRN)

Natal - RN, Novembro de 2004

A minha mais nova família,
a minha esposa Claudia
e a meu filho Pedro

AGRADECIMENTOS

Venho por meio deste, expressar os meus mais sinceros agradecimentos. Aos nomes ausentes, registro o meu perdão.

Ao meu orientador Prof. Francisco Pinheiro pelo convívio, apoio na etapa empreendida, pela força a mim confiada e pelo desejo do sucesso. Pelas discussões construtivas, meu muito obrigado.

Agradeço a PETROBRAS e a FINEP pelo apoio logístico e financeiro.

Ao Programa de Recursos Humanos (PRH-22) por mais uma oportunidade a mim concebida, de trabalhar na área da geologia do petróleo.

Aos geólogos Carlos Alberto Poletto, João de Deus Souto Filho e Alexandre Gonçalves de Melo pela oportunidade, ensinamentos e discussões, referentes a modelagem estocástica.

Aos geólogos Vivaldo Rocha e Ronaldo Freire por toda contribuição no desenvolvimento dos modelos digitais dos análogos no GoCad.

Aos professores Cláudio Pires e Maria Fátima Cavalcante pelo convívio harmonioso e experiências, dentro e fora da UFRN.

Agradeço ao INCRA/RN em nome de Vamilson Freire pelas ortofotocartas cedidas gentilmente para o presente trabalho e todos os ensinamentos sobre GPS.

A empresa Santiago & Cintra em nome dos funcionários Lincon Soares e Anderson Lima pela disponibilidade no levantamento e processamento dos dados do Laser Scanner.

Aos amigos de trabalho do GEA, pelo convívio harmonioso, experiências e principalmente pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a minha esposa Claudia pela paciência dos dias e noites ausentes.

Ao funcionário do Departamento de Geologia da UFRN Fernando Feitosa, pela disposição nas etapas de campo.

Por fim, agradeço o amigo Lalá, que durante as etapas de campo nos tratou (a mim e demais amigos) como integrantes da sua família.

ÍNDICE

| | |
|--|----------|
| DEDICATÓRIA | |
| AGRADECIMENTOS | |
| ÍNDICE | |
| ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES | |
| RESUMO | i |
| ABSTRACT | ii |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 – APRESENTAÇÃO | 1 |
| 1.2 – RELEVÂNCIA DO TEMA | 1 |
| 1.3 – OBJETIVOS | 3 |
| 1.4 – LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO | 3 |
| 1.5 - METODOLOGIA DE TRABALHO | 5 |
| 1.5.1 – RECONHECIMENTO REGIONAL | 5 |
| 1.5.2 – ARQUITETURA DEPOSICIONAL | 6 |
| 1.5.3 – MAPEAMENTO DIGITAL | 6 |
| 1.5.4 – SIMULAÇÃO DA GEOMETRIA E ARQUITETURA DO RESERVATÓRIO | 7 |
| CAPÍTULO 2 – BACIA POTIGUAR | 9 |
| 2.1 - LOCALIZAÇÃO | 9 |
| 2.2 - ARCABOUÇO ESTRUTURAL | 10 |
| 2.3 - ESTRATIGRAFIA | 10 |
| 2.4 - MAGMATISMO | 14 |
| 2.5 - EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR | 14 |
| 2.6 - FORMAÇÃO AÇU | 15 |

| | |
|---|------------|
| <u>CAPÍTULO 3 – ARQUITETURA DEPOSICIONAL</u> | 17 |
| 3.1 – SISTEMA DEPOSICIONAL FLUVIAL | 17 |
| 3.1.1 - ANÁLISE DOS ELEMENTOS ARQUITETURAIS | 23 |
| 3.2 – RECONHECIMENTO REGIONAL | 29 |
| 3.3 - CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA | 33 |
| 3.3 – SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) | 45 |
| 3.4 – ARQUITETURA FLUVIAL DA UNIDADE AÇU-3 | 49 |
| <u>CAPÍTULO 4 – MAPEAMENTO DIGITAL</u> | 53 |
| 4.1 – GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) | 54 |
| 4.2 – LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR) | 62 |
| 4.3 – GROUND PENETRATION RADAR (GPR) | 68 |
| 4.4 – MODELOS DIGITAIS | 89 |
| <u>CAPÍTULO 5 – SIMULAÇÃO DA GEOMETRIA E ARQUITETURA DO RESERVATÓRIO</u> | 98 |
| 5.1 - PETBOOL | 99 |
| 5.2 – DADOS DE ENTRADA | 100 |
| 5.2.1 - DADOS DOS POÇOS | 101 |
| 5.2.2 - HISTOGRAMAS EXPERIMENTAIS | 101 |
| 5.2.3 - DOMÍNIO, REFERÊNCIA E RESTRIÇÕES DA SIMULAÇÃO | 102 |
| 5.3 - REALIZAÇÕES EQUIPROVÁVEIS DA GEOMETRIA DO RESERVATÓRIO | 103 |
| <u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u> | 108 |
| <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> | 111 |

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

- Figura 1.1** - (a) Mapa geológico simplificado da parte emersa da Bacia Potiguar, modificado de Mont'Alverne et al. (1998); (b) Localização geográfica da área, do afloramento e do segmento do rio selecionados; (c) Fotografia aérea de pequeno formato do afloramento selecionado, com a distribuição da malha de GPR; (d) Imagem Ikonos mostrando a localização da malha de GPR levantada do rio. _____ 4
- Figura 1.2** – Fluxograma das principais etapas de trabalho realizadas. _____ 8
- Figura 2.1** – Mapa de localização da Bacia Potiguar, modificado de Mont'Alverne et al. (1998). _____ 9
- Figura 2.2** – Arcabouço tectônico da Bacia Potiguar, simplificado de Matos (1992). _____ 10
- Figura 2.3** – Carta cronoestratigráfica da Bacia Potiguar (Araripe & Feijó, 1994). _____ 12
- Figura 3.1** - Mapa de localização da área selecionada com os afloramentos estudados. _____ 18
- Figura 3.2** - Modelo deposicional do sistema fluvial meandrante e a seção colunar esquemática representada por depósitos de acreção lateral e vertical, (Walker & Cant, 1984). _____ 21
- Figura 3.3** - Modelo deposicional do sistema fluvial entrelaçado e a seção colunar esquemática do arenito Battery Point, (Walker & Cant, 1984). _____ 21
- Figura 3.4** - Modelo deposicional do sistema fluvial anastomosado (Smith & Smith, 1980). _____ 22
- Figura 3.5** – Proposta das seis ordens de hierarquias de superfícies limitantes para depósitos fluviais. Diagrama A para E representa uma sucessiva ampliação de partes de uma unidade fluvial. Numa superfície de 6ª ordem é possível reconhecer superfícies de ordem menores. Segundo Miall (1988a). _____ 26

| | |
|--|----|
| Figura 3.6 – A série de elementos arquiteturais dos depósitos fluviais, com códigos de litofácies de Miall (1978). | 26 |
| Figura 3.7 – Modelos para depósitos aluviais, definidos com base na geometria do canal e no arranjo tridimensional dos elementos arquiteturais, Miall (1996). | 28 |
| Figura 3.8 - Composições coloridas para a cena 216/64 com interpretação geológica: A) RGB (752), B) RGB (542), C) RGB (432), e D) RGB (321), modificado de Reyes-Pérez (2003). | 30 |
| Figura 3.9 – Grid altimétrico englobando toda a parte emersa da Bacia Potiguar, adquirido do projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), partes pretas da imagem representam regiões com ausência de dados. | 31 |
| Figura 3.10 – Procedimentos realizados nos sensores remotos (SRTM e Landsat) no programa GoCad®, para auxiliar na delimitação da geologia; (A) Nuvens de pontos gerada a partir dos dados SRTM; (B) Superfície representando MDT's; (C) Georreferenciamento da imagem Landsat; (D) Drape da imagem de satélite na superfície; (E e F) Detalhes do produto gerado. | 32 |
| Figura 3.11 - Mapa geológico elaborado durante o reconhecimento regional onde são apresentados os sistemas deposicionais interpretados. | 34 |
| Figura 3.12 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia Gt. | 35 |
| Figura 3.13 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia ST _(i) . | 36 |
| Figura 3.14 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia St _(a) . | 37 |
| Figura 3.15 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia St _(f) . | 38 |
| Figura 3.16 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia Sh. | 39 |
| Figura 3.17 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia Fl. | 40 |
| Figura 3.18 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia Fm. | 41 |

Figura 3.19 – Esquema apresentando como foram medidas as paleocorrentes. (a) Blocos diagramas mostrando a migração e geometria (em corte horizontal, transversal e longitudinal) de formas de leito 3D, Programa Bedform (Rubin, 1987). (b) Geometria das formas de leito 3D vista em planta, com definição dos parâmetros medidos em campo, afloramento BP/A-3/05. _____ 42

Figura 3.20 – Fotomosaicos das fotografias aéreas de pequeno formato (FAPEF's), nas duas escalas levantadas. (a) Fotomosaico mostrando afloramento BP/A-3/01. (b) Fotomosaico de parte do afloramento BP/A-3/02, em detalhe observa-se a geometria em planta e sentido da paleocorrente da forma de leito 3D. _____ 43

Figura 3.21 - Mapa de distribuição de paleocorrentes mostrando a tendência para NW. _____ 44

Figura 3.22 - Apresentação da estrutura do banco de dados montado para armazenar os dados obtidos nos afloramentos análogos. (a) Tabela principal de atributos do tema afloramento. (b) Tabela secundária de atributos do tema afloramento. _____ 46

Figura 3.23 - Apresentação da estrutura da base de dados adquiridas no levantamento de seções colunares. (a) Tabela principal de atributos do tema perfil faciológico. (b) Tabela secundária de atributos do tema perfil faciológico. _____ 48

Figura 3.24 - (A) Modelo paleogeográfico idealizado para unidade estudada (modificado de Lanzarini, 1995), (B) Distribuição esquemática das seções colunares levantadas nos afloramentos em um detalhe do modelo, (C) Correlação entre afloramentos com caracterização das superfícies limitantes de 5a ordem com base em imagem Ikonos. ____ 51

Figura 3.25 - Fotomosaico do afloramento BP/A-3/14, com interpretação das superfícies limitantes, distribuição das paleocorrentes e associação faciológica. _____ 52

Figura 4.1 – Segmentos do sistema GPS. Modificado da Trimble (1997a). _____ 55

Figura 4.2 – Representação gráfica mostrando o uso do mesmo código sincronizado no satélite e no receptor. Quando o código do satélite chega ao receptor há um retardo do sinal do código. Este tempo de retardo é usado para calcular a pseudo-distância. Adaptado da Trimble _____ 56

Figura 4.3 – (A) Características das fases portadoras. (B) Representação esquemática mostrando a solução da ambigüidade a partir da definição do número de ciclos inteiros da fase portadora entre o receptor e satélite. Adaptado da Trimble (1997b). _____ 57

| | |
|--|----|
| Figura 4.4 – Representação esquemática mostrando a relação entre Altura Elipsoidal, Altitude Ortométrica e Ondulação Geoidal. Modificado de Blitzkow (1998). | 59 |
| Figura 4.5 - Distribuição dos pontos adquiridos com o GPS Geodésico, Estação Total, bem como os dois pontos de amarração do afloramento. | 62 |
| Figura 4.6 – Distribuição das estações utilizadas e das cenas “varridas” no afloramento com o Laser Scanner. | 66 |
| Figura 4.7 – (A) “Nuvem de pontos” adquirida na cena 1, (B e C) Detalhes dos alvos na cena 1 e (D) Leitura das coordenadas dos alvos com a Estação Total. | 67 |
| Figura 4.8 – Visualizações do produto final obtido no processamento usando o programa Cyclone. | 68 |
| Figura 4.9 – Representação esquemática do método GPR mostrando a aquisição e resposta de 4 traços em um perfil de reflexão. A figura mostra ainda o comportamento da onda eletromagnética no ar, na interface ar-solo e nas descontinuidades do subsolo. Modificado de Robinson & Michaud (1999). | 69 |
| Figura 4.10 – (A) Representação esquemática da aquisição CMP (Robinson & Michaud 1999); (B) Eventos idealizados do tempo de chegada em função da separação das antenas numa sondagem CMP (Porsani, 2002). | 71 |
| Figura 4.11 – Representação esquemática de um típico sistema GPR. Modificado de Davis & Annan (1989). | 72 |
| Figura 4.12 – Malha de GPR levantada no afloramento BP/A-3/14. Os pontos PA1 e PA2 são marcos de referência do afloramento. | 73 |
| Figura 4.13 – Perfis de reflexão com antena 100 MHz levantados nas linhas 33E e 60N, mostrando ruídos e ausência de refletores geológicos. | 75 |
| Figura 4.14 – Perfis de reflexão com antena 50 MHz levantados nas perfis 33E e 60N, mostrando ruídos e ausência de refletores geológicos. | 76 |
| Figura 4.15 – Imagens Ikonos com a malha de GPR adquirida no Rio Assu. | 77 |
| Figura 4.16 – Análise de velocidade realizada na seção CMP, para determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio imageado. | 78 |
| Figura 4.17 - Apresentação do perfil de reflexão 01 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.18 - Apresentação do perfil de reflexão 02 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 80 |
| Figura 4.19 - Apresentação do perfil de reflexão 03 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 81 |
| Figura 4.20 - Apresentação do perfil de reflexão 04 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 82 |
| Figura 4.21 - Apresentação do perfil de reflexão 05 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 83 |
| Figura 4.22 - Apresentação do perfil de reflexão 06 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 84 |
| Figura 4.23 - Apresentação do perfil de reflexão 07 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 85 |
| Figura 4.24 - Apresentação do perfil de reflexão 08 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 86 |
| Figura 4.25 - Apresentação do perfil de reflexão 09 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 87 |
| Figura 4.26 - Apresentação do perfil de reflexão 10 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares. _____ | 88 |
| Figura 4.27 – Etapas envolvidas na construção do modelo de contextualização do Afloramento. (A) Entrada de dados no GoCad; (B) Superposição da geologia no MDT; (C) Drape da imagem LandSat no MDT; (D) Geração das laterais e piso do bloco diagrama; (E) Representação tridimensional das unidades geológicas da área seleciona com a localização do afloramento. _____ | 90 |
| Figura 4.28 – Procedimentos para criar surface de uma cena do Laser Scanner: (A) Nuvem de pontos da cena 01; (B) Redução da densidade de pontos; (C) Definição de curva de borda e vetor de rebatimento; (D) Surface gerada mostrando a triangulação. _____ | 91 |
| Figura 4.29 – (A) Distribuição dos pontos e respectivas ferramentas utilizadas para imagear o afloramento; (B) Modelo digital do afloramento. _____ | 92 |
| Figura 4.30 – Etapas utilizadas na construção do Modelo Fotorealístico; (A) Surface da cena 01; (B) Entrada e georreferenciamento do segmento 01 do fotomosaico; (C) e (D) Drape da imagem na surface; (E) Entrada e georreferenciamento de todos os segmentos do fotomosaico; (F) Modelo Fotorealístico. _____ | 93 |

- Figura 4.31** – Produto obtido no modelamento do afloramento _____ 94
- Figura 4.32** – Dados utilizados na contextualização do modelo do Rio Assu. _____ 94
- Figura 4.33** – (A) Contextualização regional do modelo gerado no Rio Assu; (B) e (C) Detalhe da malha de GPR levantada no Rio Assu. _____ 95
- Figura 4.34** – Etapas desenvolvidas para construção do modelo digital realizado no Rio Assu: (A) e (B) Importação e georreferenciamento de imagens referentes aos perfis de reflexão de GPR e as suas interpretações. (C) Geração de point sets a partir das interpretações dos perfis de reflexão. (D) Conjunto de point sets dos limites dos corpos sedimentares. (E) Rebatimento de surface plana no point set referente ao limite inferior do canal 5. (F) Corte da surface por planos _____ 96
- Figura 5.1** – Representação esquemática do condicionamento a poço. _____ 99
- Figura 5.2** – Curva de proporção vertical de fácies (CPVF), realizada com base em três poços verticais, contendo 20 intervalos. Modificado do guia do usuário do PetBool 3.0. _ 100
- Figura 5.3** – Parâmetros que definem um canal fluvial em três dimensões. Modificado de Lanzarini et al. (1995) e Poletto (1996) _____ 102
- Figura 5.4** – Histogramas experimentais gerados a partir da parametrização de um modelo determinístico de um reservatório da Bacia Potiguar, Poletto (1996). _____ 102
- Figura 5.5** – Distribuição equiprovável de canais para simulação realizada com 297 poços condicionantes. _____ 103
- Figura 5.6** - Gráfico do “Tempo de simulação” vs “Número de canais gerados” para os seis grupos simulados. _____ 104
- Figura 5.7** - Gráfico de “Proporção preenchida de fácies reservatório” vs “Número de canais gerados” para os quatro grupos com os maiores domínios. _____ 104
- Figura 5.8** – Resultado de duas seções elaboradas para um mesmo domínio. A primeira seção com uma malha de poços não adensada (à esquerda) e a outra em malha adensada. As seções verticais foram obtidas no mesmo local e com o mesmo sentido (Leste-Oeste), posicionadas no centro do domínio. Observa-se uma maior concentração de canais na malha adensada em relação a não-adensada. _____ 105
- Figura 5.9** - Representação esquemática dos canais gerados em cada domínio, mostrando a variação no comprimento do meandro em função do domínio simulado. _____ 106

FOTOS

Foto 3.1 - Contato entre as litofácies Fl e Gt, sendo observado na base da litofácies Gt grandes clastos de pelitos. Nível basal da seção BP/A-3/1g. _____ **35**

Foto 3.2 - Detalhe da textura da litofácies Gt, onde são observados seixos e grãos imaturos de quartzo, feldspatos e fragmentos de rocha, Afloramento BP/A-3/14. _____ **35**

Foto 3.3 - Amalgamento de litofácies $ST_{(i)}$ apresentando estratificações acanaladas de grande porte, afloramento BP/A-3/2. _____ **36**

Foto 3.4 - Camada da litofácies $ST_{(i)}$ apresentando estratificações cruzadas de grande porte BP/A-3/14. _____ **36**

Foto 3.5 - Litofácies $St_{(a)}$ em corte longitudinal ao fluxo da corrente apresentando varios sets com estratificação cruzada, afloramento BP/A-3/1. _____ **37**

Foto 3.6 - Litofácies $St_{(a)}$ mostrando detalhe de set com estratificação cruzada tangencial na base apresentando estratificações cruzadas de grande porte BP/A-3/3. _____ **37**

Foto 3.7 - Pacote de Arenito grosso a muito grosso maciço da litofácies $St_{(f)}$, afloramento BP/A-3/9 (km 98 da BR-304). _____ **38**

Foto 3.8 - Detalhe do arenito da litofácies $St_{(f)}$, contendo poucos seixos dispersos menores que dois centímetros, com ausência de estruturas sedimentares. _____ **38**

Foto 3.9 - Associação de litofácies com posicionamento da Litofacies Sh entre as litofácies de preenchimento de canal e os depósitos de acreção vertical, Afloramento BP/A-3/9. _____ **39**

Foto 3.10 - Detalhe do arenito da litofácies Sh, exibindo pseudoestratificações (liesengangs), Afloramento BP/A-3/9. _____ **39**

Foto 3.11 - Lente de lamito da litofácies Fl de pouca continuidade lateral associada com litofácies de arenosas de preenchimento de canal, Afloramento BP/A-3/3. _____ **40**

Foto 3.12 - Detalhe do lamito apresentado na foto 3.11. _____ **40**

Foto 3.13 - Pacote de lamito bastante alterado da litofácies Fm, com grande continuidade lateral, seu topo é marcado por superfície limitante de 5a ordem, com o desenvolvimento de um novo ciclo fluvial. Afloramento BP/A-3/13 _____ **41**

| | |
|---|----|
| Foto 4.1 – Ocupação do RN 442 D com GPS TOPCON dupla frequência (receptor Legacy e antena Legant). _____ | 60 |
| Foto 4.2 – Levantamento estático realizado com GPS Hiper dupla frequência, no ponto de amarração PA2. Localizado no afloramento da Fazenda Curralinho. _____ | 61 |
| Foto 4.3 – Laser Scanner Cyrax 2500 e laptop padrão IBM/PC _____ | 64 |
| Foto 4.4 – Seleção de área para tomada da cena, com base em foto digital retirada pela câmara instalada no sistema do Cyrax 2500. _____ | 64 |
| Foto 4.5 – Vista de três alvos dispostos não linearmente comuns a duas cenas. _____ | 65 |
| Foto 4.6 – Equipamento RAMAC/GPR da MALÄ GeoScience, com antena de 200 MHz. _____ | 72 |
| Foto 4.7 – Apresentação dos projetos na sala de realidade virtual da Petrobras UN-RN/CE. _____ | 97 |

TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Litofácies associadas a depósitos aluviais segundo Miall (1978). _____ | 24 |
| Tabela 3.2 – Hierarquias das unidades deposicionais em depósitos aluviais (Miall, 1991). _____ | 25 |
| Tabela 3.3 – Síntese dos Elementos Arquiteturais de Depósitos Fluviais. Modificado de Miall (1985, 1988a). _____ | 27 |
| Tabela 3.4 – Síntese das entidades temáticas presentes no SIG. _____ | 45 |
| Tabela 4.1 – Técnicas de posicionamento com sistema GPS. Dados extraídos do IBGE - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS (Normas Preliminares). _____ | 58 |
| Tabela 4.2 – Resumo dos dados da RN 442 D (obtidos da página do IBGE na Internet, www.ibge.gov.br), do transporte com GPS Geodésico efetuado neste RN e da Ondulação Geoidal. _____ | 60 |
| Tabela 4.3 – Coordenadas planas e geodésicas, bem como suas altitudes, da Estação do Crato-CE e dos pontos transportados nos levantamentos executado no método estático. _____ | 61 |
| Tabela 4.4 – Localização e número de pontos para cada cena “varrida” no afloramento. _____ | 67 |

Tabela 4.5 – Valores de constante dielétrica, velocidade, condutividade e atenuação, para materiais geológicos comuns, modificado de Davis & Annan (1989). _____ 70

Tabela 4.6 – Relação entre antenas do sistema GPR com a profundidade de penetração e resolução vertical. Modificado de Porsani (2002). _____ 70

Tabela 4.7 - Configuração da frequência de amostragem, janela de tempo e número de amostragem, para cada antena utilizada no afloramento BP/A-3/14. _____ 73

Tabela 5.1 – Dados dos projetos criados para o teste de desempenho do Petbool. ____ 101

Tabela 5.2 – Apresentação das dimensões de cada domínio simulado com seus respectivos comprimentos dos meandros gerados. _____ 106

RESUMO

Nesta dissertação são apresentados os resultados referentes ao estudo de mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos fluviais da Formação Açu. Com base no reconhecimento regional na borda sul da Bacia Potiguar foi selecionada uma área de 150 km² a oeste da cidade de Assu onde foram escolhidos os afloramentos para o mapeamento digital. Nesta área a partir de dados de campo e de sensores remotos foi montada a arquitetura deposicional para os depósitos fluviais, onde foi interpretado um sistema fluvial meandrante de granulometria grossa. Nos depósitos foram individualizados 3 ciclos fluviais, separados por superfícies limitantes de 5^a ordem. Tais ciclos são predominantemente arenosos, com granodecrescência ascendente, culminando em depósitos de planície de inundação. Internamente aos níveis arenosos de preenchimento de canal foram caracterizados ciclos menores, normalmente incompletos, formados por corpos predominantemente arenosos, amalgamados e limitados por superfícies de 4^a ordem. Na área mapeada foi escolhido um afloramento com grande exposição em corte, representado por típicos depósitos de preenchimento de canal, onde foi realizado o mapeamento digital. Neste afloramento foram empregadas diferentes técnicas e ferramentas, integrando dados sedimentológicos, altimétricos (Estação Total, GPS), LIDAR (*Light Detection and Ranging*), fotomosaicos digitais de alta resolução e de geometria interna (*Ground Penetrating Radar*). A integração, interpretação e visualização dos dados foi realizada no programa GoCad[®]. Devido à ausência de refletores observada nos radargramas, o produto final no mapeamento digital do afloramento foi o modelo fotorealístico de parte da escarpa do afloramento. Foi modelado também parte de uma barra de acresção oblíqua, segundo uma malha de GPR de 200x200 m no aluvião do Rio Assu, suposto análogo recente. Com os dados da geometria interna foi montada a arquitetura sedimentar tridimensional, onde foram caracterizados um depósito em lençol (*sand sheet*) e várias hierarquias de canais amalgamados. Por fim, foram realizadas simulações da geometria e arquitetura sedimentar de um reservatório fluvial da Bacia Potiguar com o programa PetBool, com objetivo de avaliar o desempenho deste *software* em simulações com grande número de poços condicionantes. Foram gerados no total 45 simulações, o tempo gasto e o número de canais gerados nestas aumentavam em função da quantidade de poços condicionantes. Foi detectada a deformação dos meandros a partir da mudança das dimensões do domínio simulado, a ocorrência deste problema foi devido à relação direta entre o domínio simulado e o comprimento do meandro.

ABSTRACT

In the current work are presented the results about the study of digital mapping of analogs referents the fluvial oil reservoirs in the Açú Formation. With the regional recognizing in the south corner of Potiguar Basin was selected a area of 150 Km square in the west of Assu city. In this area was chosen the outcrops for the digital mapping and from the data fields and remote sensors were done the depositional architectural for the fluvial deposits, which it was named coarse meandering fluvial systems. In the deposits were individualized 3 (three) fluvial cycles, which they was separated by bounding surface of fifth order. Such cycles are preferentially sandy, with fining-upward sequence finished in flood plain deposits. Inner of the sandy levels of the filling channels were characterized least cycles, normally incomplete, constituted by braided sandy bodies and bounding surfaces of fourth order. In the mapped area was chosen a outcrop with great exposition, where it was possible to see typical deposits of filling channel and was in this outcrop that was done the digital mapping. In this outcrop was used diverse technics and tools, which they integrated sedimentological, altimetric (GPS, Total Station), LIDAR (Light Detection and Ranging), digital photomosaic of high resolution and of the inner geometries (Ground Penetration Radar) data sets. For the integrating, interpretation and visualization of data was used software GoCAD®. The final product of the outcrop digital mapping was the photorealistic model of part of the cliff (or slope) because the observed reflectors in the radargrams were absents. A part of bar oblique accretion was modeled according to GPR gride of 200x200 meters in the alluvial Assu river probable recent analog. With the data of inner geometries was developed the three-dimentional sedimentary architectural, where it was possible characterize sand sheet deposits and many hierarchy of braided channels. At last, simulations of sedimentary geometries and architectures of the Potiguar Basin Fluvial Reservoirs were done with PetBool software, in order to understand the capacity of this program in simulations with a lot of numbers of conditioning wells. In total, 45 simulations was acquired, where the time and the channel numbers increase in relation of the conditioning wells quantity. The deformation of the meanders was detected from the change of simulated dominion dimensions. The presence of this problem was because the relationship between the simulated dominion and the width of the meander.

1.1 – APRESENTAÇÃO

Esta dissertação é um requisito obrigatório para a conclusão do curso de Mestrado desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) do Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O presente trabalho consiste na caracterização sedimentológica de depósitos antigos e recentes análogos a reservatórios petrolíferos de origem fluvial da Bacia Potiguar. Tem como enfoque principal os afloramentos da Formação Açu (Unidade Açu 3), localizados a oeste da cidade de Assu-RN e de um suposto análogo recente, o Rio Assu. Com base neste estudo foram gerados modelos digitais dos análogos e adquiridos dados quantitativos dos elementos deposicionais para uso na modelagem estocástica de objetos geométricos.

O trabalho teve apoio financeiro dos seguintes projetos: Mapeamento e Parametrização de Afloramentos do Sistema Fluvial e Flúvio-estuarino da Formação Açu – Bacia Potiguar, para uso em Modelagem Geológica 3D de Reservatórios Petrolíferos (FINEP/FNDCT/CTPETRO), Estudo de Afloramentos Análogos a Reservatórios Petrolíferos da Formação Açu (REDE-07/FINEP/FNDCT/CTPETRO) e Perfuração de Poço em "U" Utilizando Pig-lift Encordado para Elevação (FINEP/FNDCT/CTPETRO), sendo estes desenvolvidos pelo Grupo de Estudo de Afloramento Análogos a Reservatórios Petrolíferos (GEA). Também, recebeu apoio do Programa de Formação em Geologia, Geofísica e Informática no Setor Petróleo & Gás na UFRN – PRH22/ANP.

1.2 – RELEVÂNCIA DO TEMA

Para uma melhor compreensão da heterogeneidade e geometria dos reservatórios petrolíferos é necessário o reconhecimento da sua arquitetura deposicional. As heterogeneidades deposicionais, de diferentes escalas, influenciam no comportamento do fluxo de fluidos em rochas reservatório e podem ter grande impacto na recuperação avançada de hidrocarbonetos. O reconhecimento da dimensão, geometria e orientação dos corpos sedimentares em macro e megaescala, são considerados críticos no desenvolvimento e produção de óleo e gás em campos petrolíferos. Pesquisas voltadas para o reconhecimento da geometria e das heterogeneidades de reservatórios, e aplicações decorrentes, têm

possibilitado a otimização da produção, tanto por uma melhor quantificação do volume original, quanto pelo aumento do fator de recuperação.

Neste sentido, o estudo de afloramentos análogos vem sendo, desde o final da década de 80, umas das principais ferramentas empregadas para o reconhecimento das heterogeneidades dos campos de petróleo, contribuindo para a construção de modelos tridimensionais mais realísticos, dos reservatórios, suprimindo principalmente a deficiência de informações nos espaços interpoços.

No final da década de 80 e início dos anos 90, os estudos de afloramentos análogos eram restritos a cortes verticais, com enfoque principal para reconstrução da arquitetura deposicional, por meio do mapeamento detalhado de fácies, em duas dimensões (2D), em afloramentos com grande continuidade (Miall and Tyler, 1991).

As representações 2D dos afloramentos foram de grande utilidade na caracterização faciológica, petrofísica e geométrica dos corpos sedimentares, mas possuíam limitações na predição do volume de rocha e na caracterização morfométrica 3D dos corpos sedimentares. Porém, com o uso do radar penetrante no solo (GPR), para caracterização faciológica em subsuperfície, foi possível agregar a terceira dimensão no estudo dos análogos, tanto em depósitos recentes (Gawthorper *et al.* 1993, Bridge *et al.* 1995, Bristow 1995 e Bridge *et al.* 1998) como em afloramentos antigos (McMecham *et al.* 1997 e Corbeanu *et al.* 2001).

Com o desenvolvimento de novas técnicas de mapeamento digital, envolvendo tecnologias de modelagem e visualização 3D, tornou-se possível, realizar viagens de campo virtual aos afloramentos análogos, a partir de ambientes de imersão virtual 3D (Brown, 2001). No mapeamento digital dos afloramentos são empregados métodos para construção de modelos fotorealísticos 3D, integrando dados sedimentológicos, levantamento topográfico de detalhe com Estação Total, Sistema Global de Posicionamento (GPS) e/ou *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e fotomosaicos digitais de alta resolução (Xu *et al.* 2002 e Olariu *et al.* 2002). A integração do modelo fotorealístico 3D do afloramento com dados de GPR permite a construção de modelos tridimensionais da arquitetura sedimentar do afloramento (Bhattacharya *et al.* 2002 e Olariu *op. cit.*). Estes modelos 3D podem ser usados para estudos de simulação de fluxo de fluido e para parametrização (morfometria) dos elementos deposicionais.

Estudos de análise quantitativa de elementos deposicionais em afloramentos análogos têm sido de grande importância para elaboração de programas de modelagem. Estes estudos visam à obtenção de parâmetros deposicionais e sua variabilidade, com construção de banco de dados. Dentro deste contexto, podemos citar os trabalhos de Dreyer *et al.*, 1993, Menezes & Lima Filho 2001 e Menezes

2002, os quais culminaram com a montagem de uma base de dados, para uso na construção e/ou no desenvolvimento de programas de modelagem geomatemática e simulação de reservatórios.

Dentro deste contexto espera-se com esta dissertação estar contribuindo para caracterização das heterogeneidades dos reservatórios fluviais da Bacia Potiguar, com base no uso de novas geotecnologias para caracterização quantitativa dos depósitos fluviais da Formação Açu. Dados estes usados nas simulações estocásticas de reservatórios fluviais da Bacia Potiguar.

1.3 – OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho são: a) Desenvolver uma metodologia para caracterização dos análogos, com base nas ferramentas e técnicas utilizadas pelo Grupo de Estudos de Análogos a Reservatórios Petrolíferos (GEA-UFRN); b) Montar a arquitetura deposicional, apresentando as características quantitativas, em macro e mesoescala, de depósitos fluviais da Formação Açu; c) Elaborar modelos digitais dos análogos estudados, a partir das diversas ferramentas empregadas no trabalho, e d) Realizar uma análise do desempenho do programa Petbool, com base em simulações de um reservatório de origem fluvial da Bacia Potiguar.

1.4 – LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram selecionadas quatro áreas com distintos contextos geológicos: uma área para elaboração da arquitetura deposicional dos depósitos fluviais, um afloramento e um segmento do Rio Assu para geração de modelos digitais e, por fim, um reservatório petrolífero fluvial da Bacia Potiguar para aplicação da simulação estocástica.

A área escolhida para caracterização deposicional encontra-se a oeste da cidade de Assu, situada entre as coordenadas UTM 706.000 e 721.000 Este e 9.381.000 e 9.391.000 Norte, utilizando como referência o datum *South American 1969* (SAD-69). O acesso à área se faz pela BR-304, o qual a corta na direção noroeste (figura 1b). A área foi escolhida por apresentar afloramentos da Formação Açu de origem fluvial, com boa espessura e continuidade lateral.

O afloramento modelado (BP/A-3/14) encontra-se a nordeste da área estudada, localizado na Fazenda Currealinho. Ele apresenta cerca de 200 metros de exposição, com espessura média de 7 metros (figura 1c). A outra área modelada

situa-se no leito do Rio Assu, localizada próxima a cidade de Assu (figura 1d), segundo uma malha de GPR de 200 x 200 m.

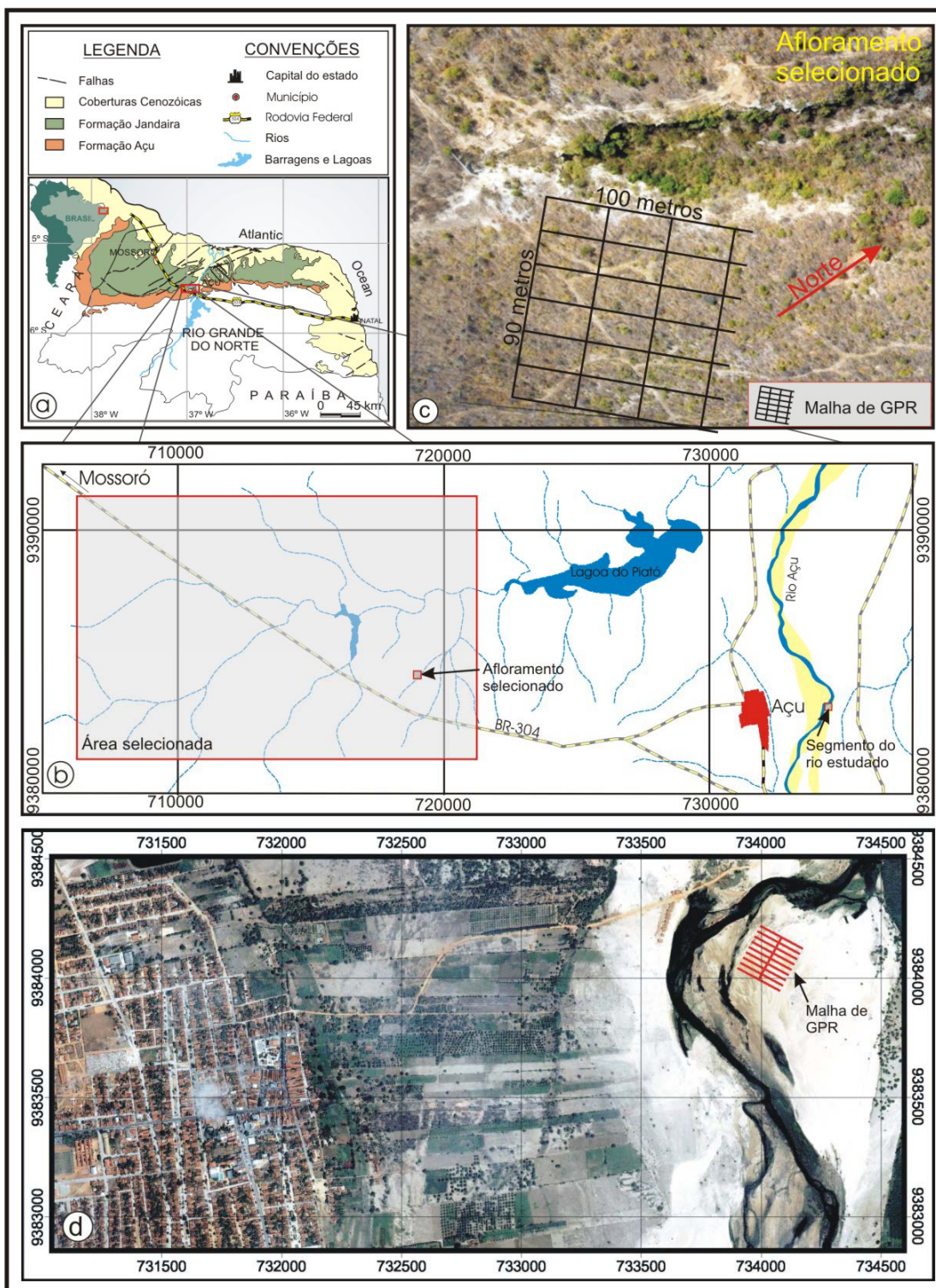


Figura 1.1 - (a) Mapa geológico simplificado da parte emersa da Bacia Potiguar, modificado de Mont'Alverne *et al.* (1998); (b) Localização geográfica da área, do afloramento e do segmento do rio selecionados; (c) Fotografia aérea de pequeno formato do afloramento selecionado, com a distribuição da malha de GPR; (d) Imagem Ikonos mostrando a localização da malha de GPR levantada do rio.

No presente relatório não foi identificado o posicionamento geográfico do reservatório simulado, de forma a preservar as informações confidenciais do acervo da empresa PETROBRÁS, conforme cláusula contratual com a FUNPEC/UFRN.

1.5 - METODOLOGIA DE TRABALHO

A metodologia utilizada neste trabalho foi uma adaptação a outras propostas encontradas na literatura, desenvolvida em função da infra-estrutura disponível no Laboratório de Análises Estratigráficas do Departamento de Geologia da UFRN e dos objetivos deste trabalho.

No trabalho foram utilizados métodos de mapeamento digital, onde são associadas diferentes técnicas e ferramentas para caracterização geológica dos análogos como, por exemplo, sensores remotos, GPS (Global positioning system), LIDAR (*Light Detection and Ranging*), SIG (Sistema de Informação Geográfica), análise de fácies, fotomontagem digital, GPR (*Ground Penetrating Radar*).

A metodologia empregada foi compartimentada em quatro etapas, denominadas respectivamente: Reconhecimento Regional, Arquitetura Depositional, Mapeamento Digital e Simulação do Reservatório.

Uma síntese sobre a metodologia é descrita a seguir e apresentada na figura 1.2. Porém, mais detalhes sobre as ferramentas e técnicas serão abordadas no decorrer deste relatório.

1.5.1 – RECONHECIMENTO REGIONAL

Os trabalhos principais na etapa de reconhecimento regional foram realizados na porção sul da faixa aflorante da Bacia Potiguar, ocupando aproximadamente 964 km², englobando partes dos municípios de Caraúbas, Upanema e Assu. O reconhecimento foi realizado com base em trabalhos prévios, gerados no âmbito do Curso de Geologia da UFRN e da Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN. A área foi mapeada, na escala de 1:50.000, conjuntamente com alunos de graduação da Disciplina Geologia de Campo II, onde foram elaborados mapas litoestratigráficos e litofaciológicos. O mapeamento foi apoiado por produtos de sensores remotos, sendo usadas fotografias aéreas, imagens Landsat e dados altimétricos do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Os afloramentos descritos foram georreferenciados com GPS de navegação, modelo Etrex Vista da marca Garmin. Esta etapa teve como produto final a seleção de uma área com afloramentos de origem fluvial apresentando boa

espessura e continuidade lateral, sendo estes passíveis de correlação para montagem da arquitetura deposicional.

1.5.2 – ARQUITETURA DEPOSICIONAL

A arquitetura deposicional montada para os depósitos fluviais da Formação Açu foi obtida com base em informações oriundas da análise de produtos de sensores remotos de alta resolução (imagens Ikonos, ortofotocartas, Fotografias Aéreas de Pequeno Formato - FAPEF's), descrições e interpretações de afloramentos. As descrições foram apoiadas com fotomosaicos digitais e Estação Total (marca Trimble, modelo 3305 DR).

Enface à grande quantidade de dados espaciais obtidos nesta etapa, estes foram integrados dentro de um SIG.

Na caracterização faciológica foram definidas as litofácies, as associação de litofácies, as superfícies limitantes e os elementos arquiteturais, com base na proposta de Miall (1985 e 1988).

Durante as descrições das fácies sedimentares foi dada prioridade ao levantamento de seções colunares, para melhor caracterização das associações vertical de fácies. As paleocorrentes foram adquiridas nos afloramentos com grande exposição em planta ou indiretamente por meio de FAPEF's.

A arquitetura deposicional foi montada levando-se em conta o arranjo tridimensional dos afloramentos e o basculamento dos estratos sedimentares, tendo como produto o modelo de fácies realístico.

1.5.3 – MAPEAMENTO DIGITAL

O Modelo digital do afloramento foi gerado a partir da integração e interpretação dos dados sedimentológicos, plani-altimétricos de detalhe, perfis de GPR e fotomosaicos digitais de alta resolução, levantados nos análogos. Para contextualização geológica do afloramento foram agregados ao modelo dados obtidos no levantamento da arquitetura deposicional. Para a caracterização de geometrias não identificadas nos afloramentos foi modelado um pequeno segmento do Rio Assu, onde foram usados exclusivamente dados de GPR. Para geração dos modelos digitais dos análogos foi utilizado o programa GoCad®, sendo este um dos principais *softwares* de modelagem e visualização 3D utilizado na indústria petrolífera.

O levantamento plani-altimétrico foi realizado com o uso de três ferramentas. Com o GPS foram transportadas as coordenadas com base na Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE e aquisição de dados de planta do afloramento. O Laser Scanner 3D Cyrax 2500 (LIDAR) foi usado para o imageamento da escarpa do afloramento. Para abertura da malha e correções topográficas dos dados de GPR foi utilizada a Estação Total.

Os perfis de reflexão com GPR foram adquiridos com o equipamento RAMAC/GPR (*MALA Geoscience*). Os perfis levantados no afloramento compõem uma malha com um total de onze linhas. A malha é composta por sete linhas paralelas ao corte principal do afloramento; as linhas possuem espaçamento de 15 metros, sendo que a primeira linha encontra-se cerca de 20 metros do corte. As outras quatro linhas estão ortogonais ao corte principal do afloramento com espaçamento de 30 metros (figura 1c). Foram levantados um total de 2.120 metros. No Rio Assu foram levantadas 10 linhas de GPR de 200 metros, sendo 9 linhas paralelas com espaçamento de 25 metros e uma transversal (figura 1d).

1.5.4 – SIMULAÇÃO DA GEOMETRIA E ARQUITETURA DO RESERVATÓRIO

As simulações foram realizadas com o *software* “PetBool”, tendo como dados de entrada os parâmetros adquiridos por Poletto (1996). Estes parâmetros foram obtidos a partir do modelo determinístico, gerado por Santos e Poletto (1993; *apud* Poletto, 1996), de um reservatório fluvial da Bacia Potiguar. As simulações foram geradas neste mesmo reservatório.

O PetBool é um *software* de modelagem geométrica e simulação estocástica de feições discretas, tais como, unidades genéticas e heterogeneidades diagenéticas dos reservatórios. Com a combinação de métodos estocásticos e geométricos é possível obter realizações equiprováveis da arquitetura do reservatório.

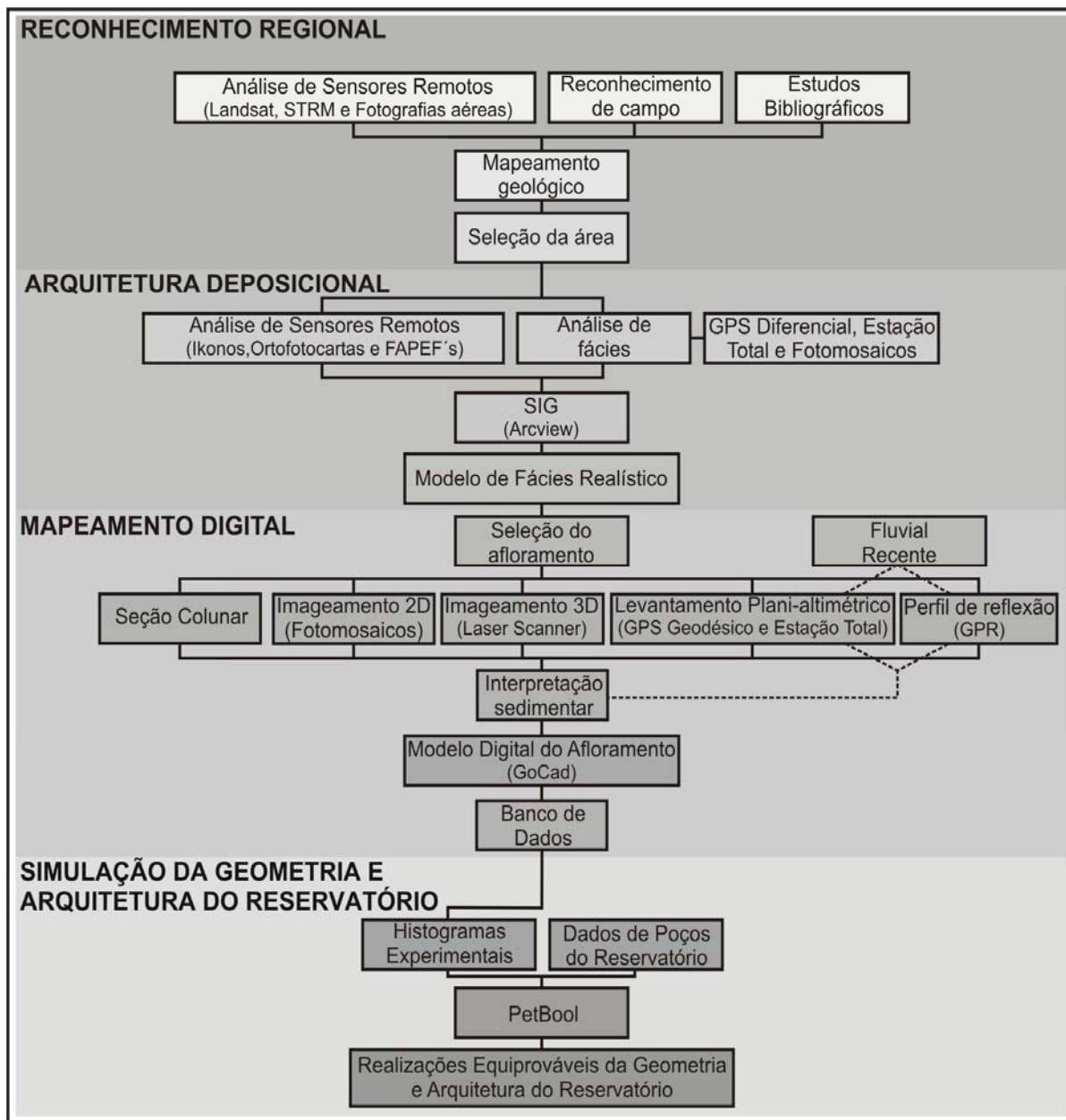


Figura 1.2 – Fluxograma das principais etapas de trabalho realizadas.

O rifte Potiguar resultou de esforços extensionais que culminaram na separação das placas sul-americana e africana durante o Cretáceo inferior. Sua evolução geológica contribuiu para geração e acumulação de petróleo. A Bacia Potiguar possui uma grande importância no cenário do petróleo brasileiro, sendo o principal produtor terrestre do país. Neste capítulo é apresentado um arcabouço geológico sobre a Bacia Potiguar com enfoque para a Formação Açú.

2.1 - LOCALIZAÇÃO

A Bacia Potiguar está localizada no extremo leste da margem equatorial do Brasil, compreendendo parte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, bem como suas plataformas continentais. A bacia é limitada a sul e a oeste por rochas do embasamento cristalino, ao norte e leste pelo Oceano Atlântico e, a noroeste, pela Bacia do Ceará (figura 2.1).

Segundo Bertani *et al.* (1990), a Bacia Potiguar abrange uma área de aproximadamente 48.000km², com cerca de 21.000km² em sua porção emersa e com 27.000 km² em sua porção submersa na plataforma e talude continental.

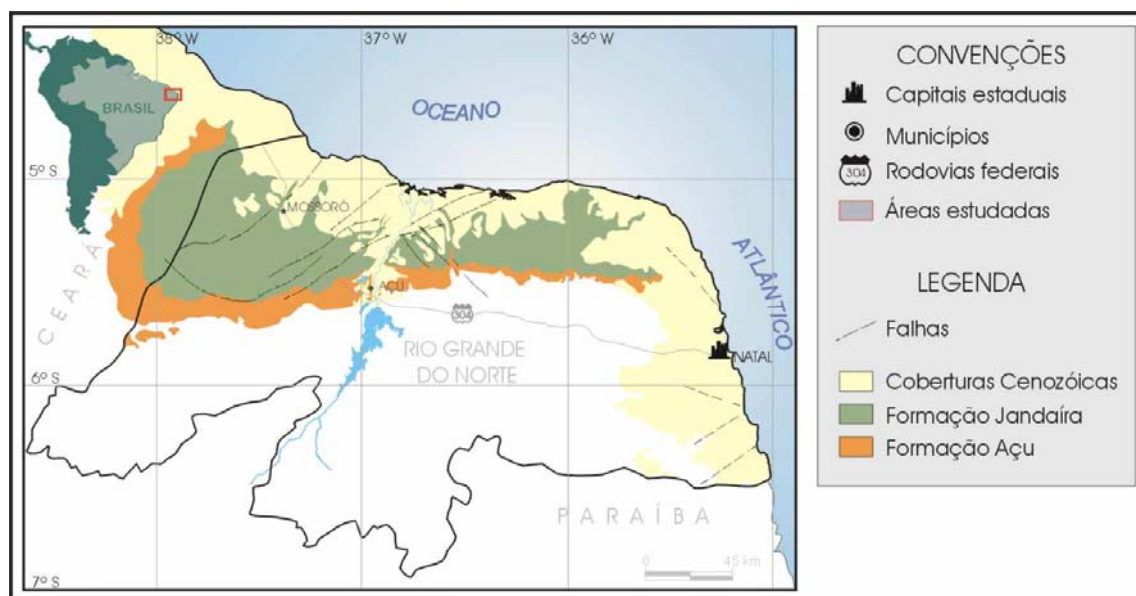


Figura 2.1 – Mapa de localização da Bacia Potiguar, modificado de Mont’Alverne et al. (1998).

2.2 - ARCABOUÇO ESTRUTURAL

Quatro feições morfo-estruturais (grabens, altos internos, plataformas rasas do embasamento e talude) predominam no arcabouço estrutural da Bacia Potiguar, estando estas feições relacionadas com os grandes eventos de estiramento crustal (rifte) e da fase de deriva continental que afetaram a bacia (figura 2.2).

Segundo Matos (1992) o Rifte Potiguar foi implantado sobre rochas do embasamento cristalino, aproveitando seu *trend* predominante de direção NE-SW, durante o Cretáceo Inferior, sendo a Falha de Carnaubais a principal falha do Rifte Potiguar. Segundo Hackspacher & Oliveira (1984) a Falha de Carnaubais está associada a uma possível reativação da Zona de Cisalhamento de Portalegre de idade Brasileiro.

Além das estruturas de direção NE-SW presentes na bacia, são observadas outras importantes estruturas de direção NW-SE, interpretadas por Hackspacher *et al.* (1985), como produto de reativações pós-campanianas. Matos (1992) interpreta estas estruturas como sendo falhas de transferência durante a fase rifte inicial. Cremonini *et al.* (1996) caracterizaram este padrão de falhamentos NW-SE e NE-SW na porção submersa da bacia como sendo o produto de superposição de fases de rifteamento.

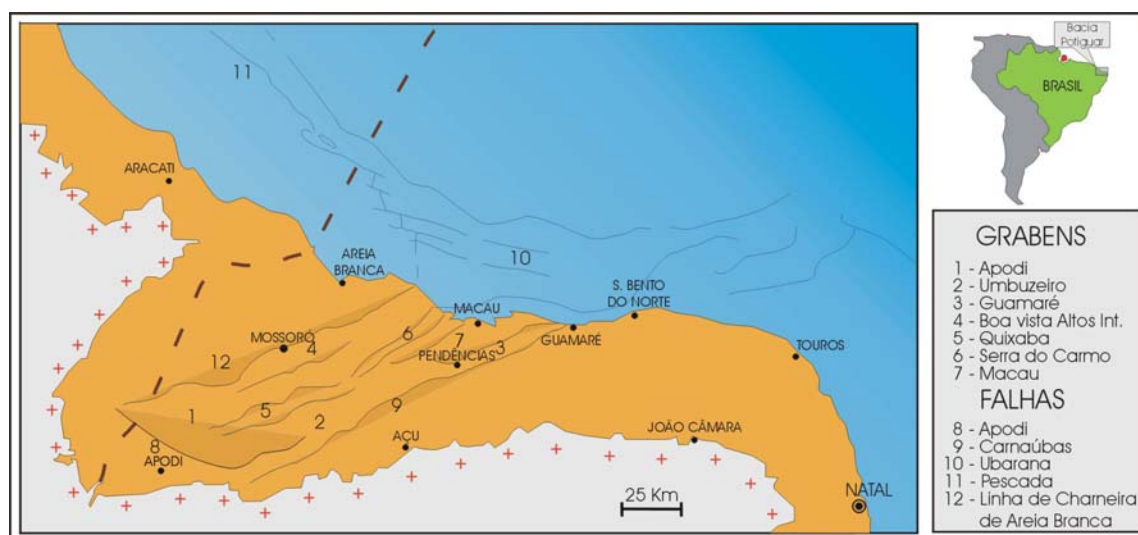


Figura 2.2 – Arcabouço tectônico da Bacia Potiguar, simplificado de Matos (1992).

2.3 - ESTRATIGRAFIA

Segundo Souza (1982) o preenchimento sedimentar desta bacia está intimamente relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica, sendo a Formação Pendência associada à fase rifte; a Formação Alagamar à fase

transicional; e as Formações Açú, Ponta do Mel, Jandaíra, Ubarana, Tibau e Guamaré relacionadas à fase drifte.

Araripe & Feijó (1994) sugeriram uma nova organização litoestratigráfica para a bacia, subdividindo as seqüências sedimentares em três grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha. Compõem ainda, nessa proposta, as rochas vulcânicas, individualizadas nas formações Rio Ceará-Mirim, Serra do Cuó e Macau (figura 2.3).

O Grupo Areia Branca, que engloba as Formações Pendência, Pescada e Alagamar, é caracterizado por conteúdo essencialmente clástico.

A Formação Pendência (Souza, 1982) é representada por rochas siliciclásticas e carbonáticas, interpretadas como um sistema fluvio-deltáico-lacustrino equivalentes Rio da Serra superior ao Jiquiá, que repousam dicordantemente sobre o embasamento cristalino. Nas seções mais basais desta formação, predomina uma sedimentação lacustre associados com depósitos de leques aluviais e de fandeltas, gerados na margem falhada e na margem flexural. Já nas porções mais superiores a sedimentação é predominantemente fluvio-deltáica, ficando a sedimentação lacustre reduzida a trechos isolados na bacia.

A Formação Pescada (definida por Araripe & Feijó, 1994) refere-se à cunha clástica sin-tectônica, reconhecida inicialmente na região do campo produtor de “Pescada”. É representada por conglomerados e arenitos, depositados em um sistema de leques aluviais, cuja atividade está geneticamente relacionada ao final da fase rifte na bacia.

Souza (1982) caracterizou a Formação Alagamar como uma formação subdividida no Membro Upanema, Camada Ponta do Tubarão (CPT), Membro Galinhos e Membro Aracati. Araripe & Feijó (1994) incluíram o Membro Aracati na Formação Açú e definiram a Formação Alagamar como sendo composta por arenitos e lamitos interpretados como de origem fluvio-deltáica (Membro Upanema) e transicional (Membro Galinhos), separados por um intervalo de folhelhos pretos e calcilutitos ostracoidais, de ambiente transicional (Camada Ponta do Tubarão). Dados bioestratigráficos fornecem uma idade neo-Aptiana para estas rochas.

O Grupo Apodi é representado pelas Formações Açú, Jandaíra, Quebradas e Ponta do Mel, segundo Araripe & Feijó (1994).

A Formação Açú é representada por uma sucessão de rochas siliciclásticas variando desde conglomerados a argilitos, constituindo a porção continental da Seqüência Transgressiva Albo-Cenomaniana (Bertani *et al.*, 1990). A Formação Açú, principal enfoque deste trabalho, será explorada com maiores detalhes no item 2.6.

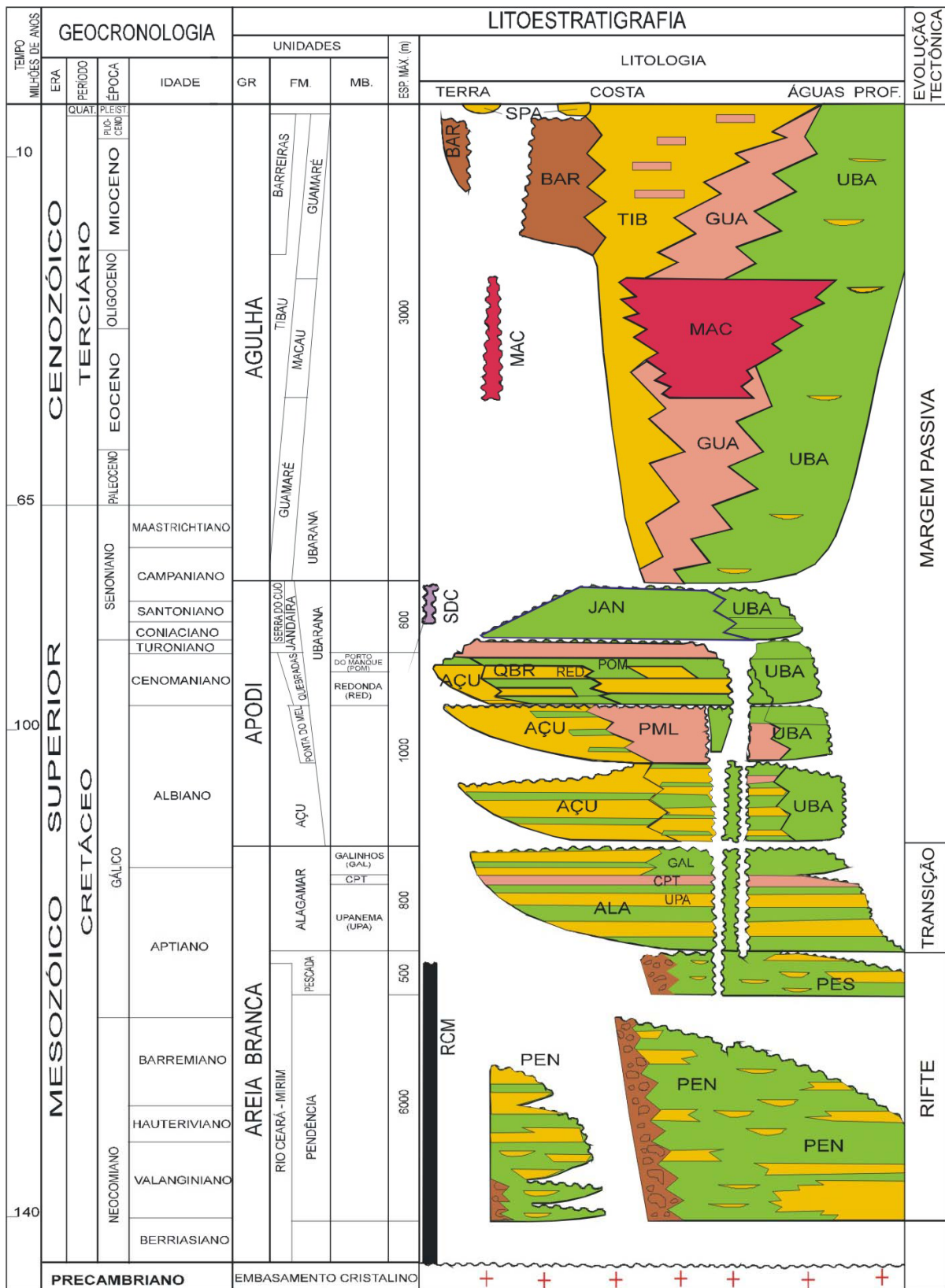


Figura 2.3 – Carta cronoestratigráfica da Bacia Potiguar, modificado de Araripe & Feijó (1994).

A Formação Ponta do Mel é representada por rochas carbonáticas interpretadas como de origem marinha rasa, abrangendo tanto os sistemas de planície de maré quanto o de mar aberto. Foi definida por Tibana & Terra (1981; *apud* Araripe & Feijó, 1994). Recobre concordantemente os clásticos eoalbianos da Formação Açú. Sua idade é estimada como Neo-Albiano.

A Formação Quebradas foi dividida por Araripe & Feijó (1994) em dois membros: Redonda e Porto do Mangue, sendo constituídos, respectivamente, de arenitos e folhelhos. Seus ambientes de deposição são marinhos de plataforma e talude, depositados durante o Cenomaniano. O contato inferior é discordante com a Formação Ponta do Mel e, o superior, é concordante com a Formação Jandaíra.

A Formação Jandaíra, proposta primeiramente por Sampaio & Schaller (1968; *apud* Araripe & Feijó, 1994), é constituída por calcarenitos, calcarenitos bioclásticos e calcilutitos. Os sedimentos foram depositados em uma grande plataforma carbonática que recobriu toda porção emersa da bacia, entre o Turoniano e o Meso-Campaniano. Monteiro & Faria (1990) interpretam dois tipos distintos de modelos para plataforma carbonática da Formação Jandaíra, sendo o primeiro modelo associado a uma rampa carbonática sem borda definida, com fácies de águas rasas passando gradativamente para fácies de águas profundas; o segundo modelo consiste de uma plataforma carbonática com borda formada por bancos bioclásticos, restringindo uma plataforma ampla e rasa. Na parte emersa predominam sedimentos de fundo de laguna e de barras bioclásticas. Na área de Governador Dix-Sept Rosado afloram evaporitos de supramaré. Córdoba (2001) define diferentes sistemas deposicionais para as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, dispostos em uma ampla rampa carbonática. A rampa interna caracterizada por sistemas estuarino, de praia, de planície de maré, lagunar, manchas recifais e barras de maré carbonáticas; a rampa intermediária representada por depósitos de tempestades, e na rampa externa por turbiditos finamente acamadados. Esta formação possui um contato concordante com os clásticos transicionais das Formações Açú e Quebradas, tendo seu topo moldado por uma grande discordância neocampaniana que marca o final da seqüência marinha transgressiva. Esta unidade constitui o litotipo dominante que aflora na Bacia Potiguar emersa, sendo constatado em poços com espessura de até 600 metros.

O Grupo Agulha abrange os sistemas de leques costeiros, plataforma e talude, depositados entre o Neocampaniano e o Recente, representados, respectivamente, pelas Formações Barreiras, Tibau/Guamaré e Ubarana.

2.4 – MAGMATISMO

Araripe & Feijó (1994) individualizaram três eventos magmáticos, representados em três formações: Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau.

A Formação Rio Ceará Mirim é representada por diques de diabásio toleíticos com forte orientação E-W, apresentando idades entre 120 e 140 Ma. Segundo Oliveira (1993) este evento magmático pode estar relacionado à formação do Rifte Potiguar.

A Formação Serra do Cuó é representada por diques de diabásio com tendência alcalina, com idades de aproximadamente 53 Ma.

A Formação Macau corresponde aos derrames de olivina-basalto que ocorrem intercalados às rochas das Formações Tibau, Guamaré e Ubarana. Também formam as intrusões do Pico do Cabugi e de Pedro Avelino. Estes derrames foram datados por Mizusaki (1987) com idades variando entre 29 e 45 Ma.

2.5 - EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR

Diversos autores consideram a separação do super continente Gondwana como responsável pela origem das bacias interiores do nordeste brasileiro.

Françolin & Szatmari (1987) definem um regime de esforços com distensão norte-sul e compressão leste-oeste, durante o Neocomiano, responsável pela formação do Rifte Potiguar, que foram gerados pela rotação diferencial dextral da placa Sul-Americana em relação à Africana. Estes autores definem a presença dos diques de diabásio da Formação Rio Ceará Mirim como responsável pela separação dos segmentos transtensional a NE e transpressional a SW. Durante o Aptiano, prosseguiu a distensão N-S e, no Eoalbiano, teve início o movimento divergente Leste-Oeste, entre as placas Sul-Americana e Africana, gerando um cisalhamento dextral na atual margem equatorial.

Matos (1987; 1992) propôs a evolução do Rifte Potiguar mediante duas fases principais de rifteamento (Sin-Rifte II e Sin-Rifte III). O estágio Sin-Rifte II (Neocomiano-Eobarremiano) foi originado por esforços distensivos máximos, que passaram a atuar segundo a direção E-W, e o estágio Sin-Rifte III (Neobarremiano), caracterizado por um processo distensivo, que começou a concentrar a deformação ao longo da futura margem continental, causando uma grande mudança na cinemática rifte.

O final da fase rifte, na Bacia Potiguar, é marcado pela deposição dos sedimentos da Formação Alagamar, durante o Neo-aptiano, sendo estes confinados aos limites do rifte na porção emersa. Rodrigues *et al.* (1983; *apud* Araripe & Feijó 1994) sugerem que a primeira invasão marinha na bacia tenha ocorrido nesta idade.

A deposição dos sedimentos siliciclásticos da Formação Açú e da plataforma carbonática da Formação Ponta do Mel, estão associadas ao início de um grande ciclo marinho transgressivo durante o Albiano. O apogeu deste ciclo é marcado pela implantação da plataforma carbonática da Formação Jandaíra, afogando os sistemas aluviais da Formação Açú.

Uma seqüência regressiva deposicional é iniciada após um forte evento erosivo no Neocampaniano. Moraes Neto (1999) associa este evento a um soerguimento causado pela presença de uma pluma mantélica. O registro sedimentar desta grande regressão na bacia é dado pelas Formações Barreiras, Tibau, Guamaré e Ubarana.

2.6 - FORMAÇÃO AÇU

A Formação Açú, de idade Albo-Turoniano, é constituída por sedimentos siliciclásticos, com predominância de arenitos e lamitos, que formam uma sucessão estratigráfica da ordem de centenas de metros de espessura, compondo ciclos de afinamento textural para o topo. Esta deposição está relacionada a um evento transgressivo que culmina com os carbonatos de plataforma da Formação Jandaíra.

Os sistemas deposicionais interpretados para as rochas que compreendem a Formação Açú, correspondem a depósitos de leques aluviais na base, seguindo-se sistemas fluviais entrelaçados e meandranes, constituindo a maior parte da formação, e de complexos estuarinos e litorâneos no seu topo (Castro & Barrocas, 1981).

A Formação Açú possui, em média, uma faixa aflorante de 15km de largura, ao longo da borda da bacia, recobrando o embasamento cristalino com espessura de até 200 m. Porém, na região submersa da bacia, sua espessura atinge cerca de 1000 m. Nesta unidade litoestratigráfica encontram-se os principais reservatórios de hidrocarbonetos da Bacia Potiguar, e constitui um importante aquífero da região Nordeste.

Vasconcelos *et al.* (1990) a partir da análise de perfis elétricos, descrição de afloramentos e testemunhos, compartimentaram a Formação Açú em quatro unidades estratigráficas operacionais (denominadas de unidades Açú-1 a Açú-4), identificáveis em perfis de poços e rastreáveis por correlação ao longo de toda a porção emersa da bacia. A unidade Açú-1 representa depósitos de leques aluviais.

As unidades Açú-2 e Açú-3 correspondem aos grandes ciclos fluviais da Formação Açú, apresentando padrão de afinamento textural para o topo. A base da unidade Açú-3 é caracterizada por uma reativação do sistema fluvial. A unidade Açú 4 é constituída por depósitos de origem estuarina.

A Unidade Açú-3, alvo do presente trabalho, é representada por depósitos de origem fluvial, do tipo entrelaçado, que gradam para depósitos correspondentes a sistema fluvial meandrante grosso. Lanzarini (1995) adotou o modelo “meandrante de granulometria grossa” de Brown (1973; *apud* Lanzarini 1995), para os depósitos fluviais da Formação Açú, com base em dados de poços testemunhados e de três afloramentos representativos da Unidade Açú-3.

A Unidade Açú-3 foi uma das primeiras unidades estratigráficas estudadas no Brasil, visando à caracterização da variabilidade e parâmetros do sistema fluvial, onde são destacados os trabalhos de Becker *et al.* (1992), Becker (1996), Lanzarini (1995), e Barton *et al.* (1995), sendo estes estudos, executados nos afloramentos do km 98 e km 99 da BR-304. Também, destaca-se o trabalho de parametrização de canais fluviais, realizado a partir de um modelo detalhado de subsuperfície, proposto por Poletto (1996), e a partir de afloramentos Menezes (2002), Menezes e Lima Filho (2001) e Poletto *et al.* (2002).

Enface à dificuldade em realizar novas descobertas significativas de campos de petróleo e à existência de grande quantidade de campos maduros, a indústria do petróleo tem direcionado esforços para maior compreensão das heterogeneidades dos reservatórios, de forma a aumentar o fator de recuperação dos campos de petróleo. Neste contexto os estudos de caracterização deposicional quantitativa, em afloramentos análogos, têm contribuído significativamente para uma maior compreensão das heterogeneidades e geometrias dos reservatórios petrolíferos.

A evolução científica relacionada ao conhecimento de depósitos fluviais, ocorrida nos últimos 15 anos, tem permitido consideráveis avanços no estudo de reservatórios petrolíferos, principalmente com aplicação da Técnica de Análise de Elementos Arquiteturais, proposta por Miall (1985 e 1988a).

Nesse capítulo será apresentada, primeiramente, uma síntese sobre sistema fluvial, mostrando os principais modelos de fácies fluviais, focado principalmente na proposta metodológica aplicada a depósitos fluviais de Miall (1985 e 1988a), denominada de “Análise dos Elementos Arquiteturais”.

Em seguida é aplicada esta metodologia na montagem da arquitetura deposicional de rochas fluviais da Unidade Açú-3, de uma área com 150 km² localizada na porção sul da Bacia Potiguar (figura 3.1). A área foi selecionada a partir do reconhecimento regional realizado ao longo da faixa aflorante da Formação Açú. Na caracterização deposicional foram utilizadas informações obtidas na análise de produtos de sensores remotos, de descrições e interpretações dos afloramentos. Todos os dados adquiridos estão agrupados em um SIG. Na caracterização faciológica foram definidas as litofácies, associação de litofácies, superfícies limitantes e elementos arquitetuais com base na proposta de Miall (1985 e 1988a).

3.1 – SISTEMA DEPOSICIONAL FLUVIAL

Os rios são cursos naturais de água doce, na maioria das vezes com canais definidos e fluxo permanente ou sazonal que migra em direção a um oceano, lago ou outro rio. Dada a sua capacidade de erosão, transporte e deposição, os rios são uns dos principais agentes dos processos exógenos.

Os rios e as drenagens podem ser classificados de diferentes formas, sendo

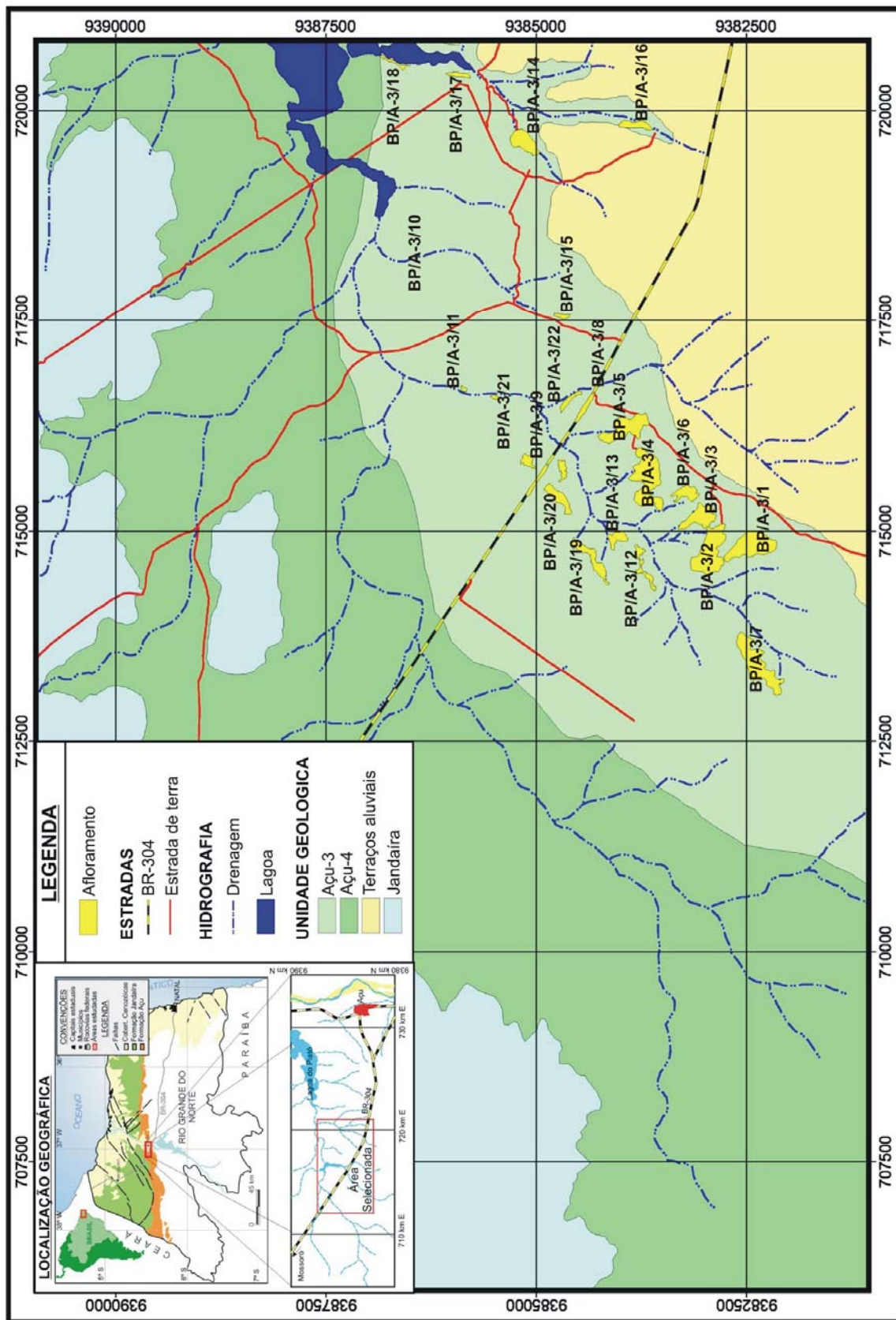


Figura 3.1 - Mapa de localização da área selecionada com os afloramentos estudados.

considerados de forma geral, as classificações com base no padrão de drenagem, no comportamento das drenagens em relação ao substrato e na morfologia dos canais. Porém, a morfologia dos canais é o principal atributo no ponto de vista geológico, onde estão embasadas as principais classificações difundidas na literatura (Riccomini *et al.* 2000).

Os principais estudos dos padrões fluviais classificam a morfologia dos canais, vista em planta, em quatro padrões básicos, designados de: retilíneo, meandrante, entrelaçado e anastomosado (Miall, 1977). Estes padrões são também caracterizados em função dos parâmetros morfométricos dos canais, como sinuosidade, grau de entrelaçamento e relação entre largura e profundidade. A relação largura/profundidade oferece também uma boa discriminação entre os diferentes tipos de rios, onde razões > 40 são típicos de rios entrelaçados, enquanto que os outros tipos possuem valores < 40 (Rust, 1978). Os canais dos rios nem sempre estão representados na natureza pelos seus extremos (*end member*), sendo comum a observação de padrões intermediários. Ao longo de um mesmo rio pode-se observar a passagem gradativa de características próprias de um determinado padrão para outro. Podem ocorrer variações também em função da descarga do rio nas épocas de cheia e de estiagem (Riccomini *et al.*, 2000). Outra classificação, proposta por Schumm (1981), relaciona os padrões dos rios com base no regime predominante do transporte da carga sedimentar (suspensão, por tração ou misto), onde é possível desmembrar os padrões principais em tipos intermediários. Os fatores que controlam a variação na descarga e o tipo de carga sedimentar são variáveis, sendo condicionado pelo clima e cobertura vegetal, bem como casos particulares condicionados pela ação antrópica.

A interpretação de um sistema deposicional materializa a reconstrução paleogeográfica de uma determinada área, em um específico tempo geológico, tendo como base a leitura de fácies sedimentares em afloramentos ou testemunhos, como também o seu arranjo tridimensional. Segundo Walker (1984) o termo fácies é o produto resultante da atuação de processos físicos, químicos e biológicos nos diferentes sistemas deposicionais. De maneira geral, pode-se descrever o termo fácies como o produto resultante de processos sedimentares responsáveis pela caracterização da rocha, podendo assumir caráter genético, descritivo, ambiental ou tectônico. Em sistemas deposicionais fluviais, as dimensões e morfologias das fácies sedimentares, bem como o seu arranjo interno, estão intimamente relacionadas à morfologia dos canais fluviais.

Várias propostas de modelos deposicionais fluviais foram apresentadas, desde a década de 70, porém os modelos mais difundidos na literatura são os modelos meandrante e entrelaçado, criados por Walker & Cant (1984).

O modelo meandrante, proposto por Walker & Cant (1984), foi baseado na observação de muitos exemplos modernos e antigos, com apresentação de um ciclo ideal para seqüência vertical de fácies. O modelo entrelaçado basea-se principalmente na fisiografia do rio *South Saskatchewan* e apresenta como seqüência vertical ideal, uma seção colunar esquemática do Arenito *Battery Point*.

Os rios meandrantos possuem alta sinuosidade, predominam material transportado em suspensão e morfologias com suaves declividades. Walker & Cant (1984) apresentam um arranjo deposicional para sistema meandrante composto por um canal meandrante ativo, meandros abandonados e uma série de outros depósitos formados próximos ao canal ativo, representados por barras de acreção lateral, diques marginais e depósitos de transbordamento. Seqüências completas representativas de sistemas meandrantos apresentam uma sucessão de fácies com granodecrescência ascendente, constituídas por depósitos de *lag* residual na base, sucedidas por seqüências arenosas de acreção lateral da barra em pontal, pelos depósitos de diques marginais e pelitos da planície de inundação (acreção vertical) (figura 3.2). Os depósitos de *lag* residual são representados por fácies areno-conglomeráticas, com estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande porte; nesses depósitos são comuns a presença de clastos de argilas. Nas barras em pontais são depositadas areias finas a médias com estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande porte e cruzadas tabulares, porém com a diminuição da energia do fluxo podem ser encontradas, nos topos dessas barras, estratificações plano-paralelas e laminações cruzadas cavalgantes. Os depósitos de diques marginais são caracterizados por estruturas sedimentares similares àquelas encontradas na barra em pontal, com granulometria mais fina. Neste sistema os depósitos de transbordamento são constituídos por extensos pacotes de siltitos e argilitos, com a presença bastante comum de marcas de raízes e gretas de dissecação (Allen, 1970; *apud* Walker e Cant, 1984).

Segundo Walker e Cant (1984), o sistema fluvial entrelaçado (*braided*) possui um arranjo deposicional marcado principalmente pela presença de sedimentos grossos, resultante de intensas descargas. Este modelo é marcado por uma complexidade de feições deposicionais, representadas por formas de leitos individuais (dunas 2D e 3D), barras transversais e longitudinais e um complexo de planície arenosa (*sand flat* e ilhas vegetadas) (figura 3.3). Seqüências completas são marcadas por uma sucessão de fácies com granodecrescência ascendente, representados na sua base por depósitos de preenchimento de canal.

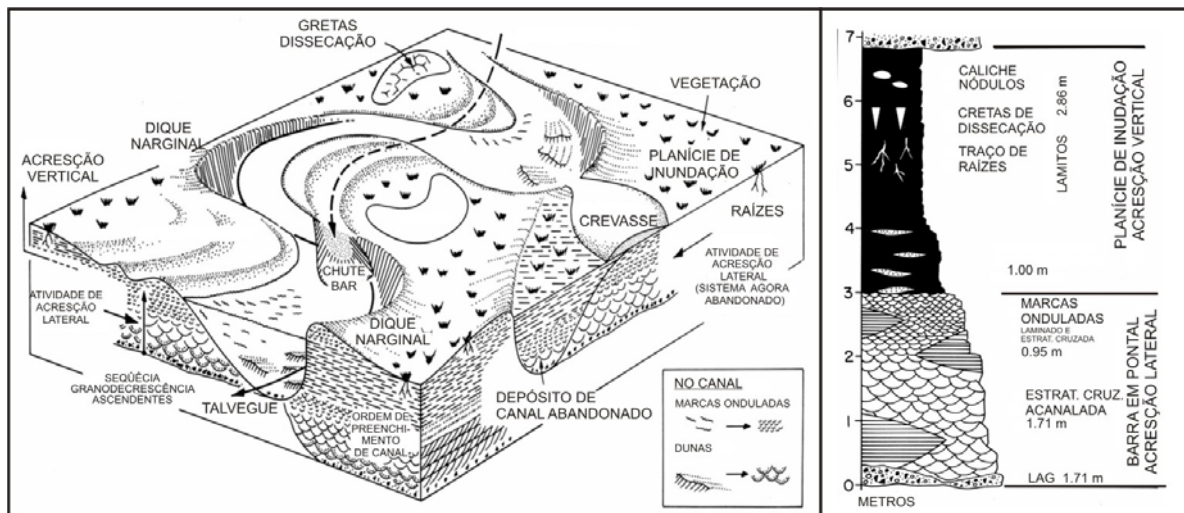


Figura 3.2 - Modelo deposicional do sistema fluvial meandrante e a seção colunar esquemática representada por depósitos de acreção lateral e vertical, (Walker & Cant, 1984).

Os depósitos de *lags* residuais são mais expressivos do que aqueles encontrados no modelo meandrante, apresentam textura extremamente grossa, podendo apresentar estratificações cruzadas acanaladas; na porção intermediária da seqüência vertical encontram-se sedimentos grossos com estratificações cruzadas, passando a cruzadas tangenciais, atingindo gradativamente sedimentos menos grossos, com estratificações cruzadas de baixo ângulo, caracterizando os depósitos de topo de barras. A parte superior da sucessão é representada por depósitos pelíticos, de acreção vertical, intercalados com arenitos finos. Esta parte superior é raramente preservada, devido a processos erosivos gerados no pulso descarga seguinte (Walker e Cant, 1984).

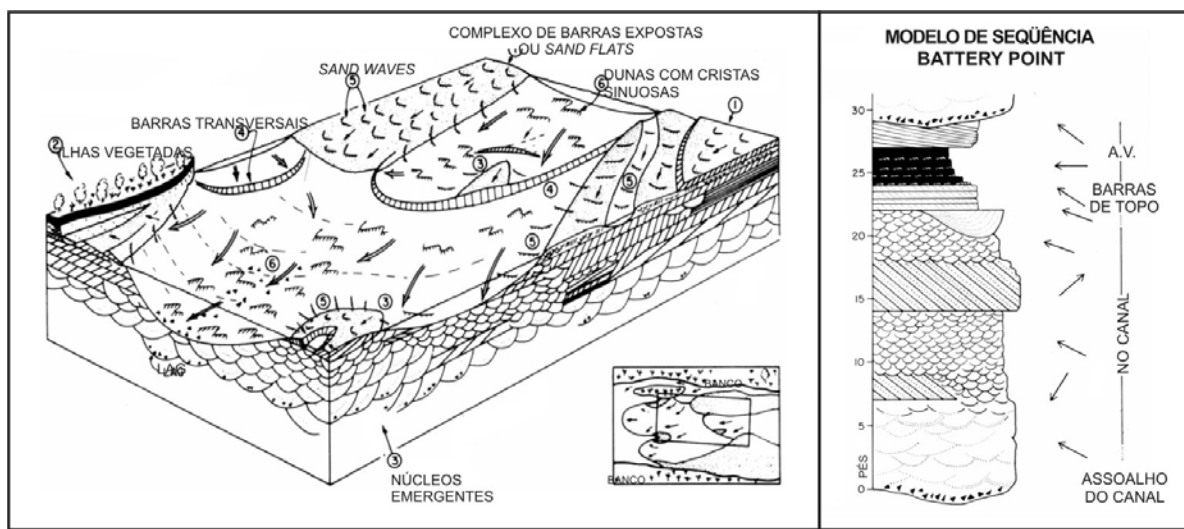


Figura 3.3 - Modelo deposicional do sistema fluvial entrelaçado e a seção colunar esquemática do arenito Battery Point, (Walker & Cant, 1984).

Outro modelo deposicional bastante difundido é o sistema anastomosado (*anastomosed*) definido por Smith & Smith (1980). Este modelo é formado por uma rede de canais interconectados, relativamente profundos e estreitos, retilíneos a sinuosos, em locais de baixo gradiente. Os canais são caracterizados por arenitos grossos e conglomerados e a planície de inundação por lamitos. Neste sistema, predomina agradação vertical. Mesmo com sua difusão, muito pesquisadores consideraram prematura a proposição deste modelo, devido aos poucos exemplos modernos e antigos (figura 3.4).

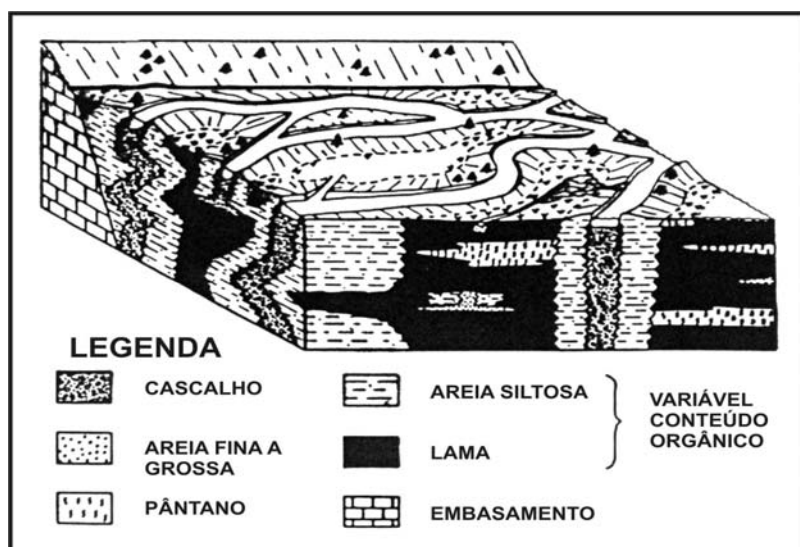


Figura 3.4 - Modelo deposicional do sistema fluvial anastomosado (Smith & Smith, 1980).

Os modelos meandrante e entrelaçado são considerados como os membros extremos do sistema fluvial, entretanto é comum na literatura a referência de modelos com características intermediárias aos modelos extremos. Dentro deste contexto podemos citar o trabalho de Miall (1996), que define 12 modelos deposicionais aluviais, nos quais a maioria representa características intermediárias aos modelos meandrante e entrelaçado proposto por Walker e Cant (1984). Estes modelos foram idealizados usando um método de análise de fácies denominada de “Análise dos Elementos de Arquitetura” (*Architecture Element Analysis*) (Miall, 1985). No decorrer deste item será apresentada uma síntese sobre esta proposta.

Trabalhos mais recentes tentam aplicar os conceitos da Estratigrafia de Seqüência em sistemas fluviais, nesse contexto podemos citar trabalho de Richards (1996), que baseado na Estratigrafia de Seqüência de Alta Resolução procura caracterizar as arquiteturas fluviais levando em conta o processo de flutuação do nível de base ao qual o sistema está relacionado.

3.1.1 - ANÁLISE DOS ELEMENTOS ARQUITETURAIS

Esta abordagem metodológica de análise faciológica aplicada a depósito fluvial, proposta por Miall (1985), baseia-se nos trabalhos de Jackson (1975), que classifica as formas de leito e estruturas em microformas, mesoformas e macroformas, e de Allen (1983) que reconhece as hierarquias de contatos em oito tipos de feições deposicionais fluviais.

O conceito de Arquitetura Sedimentar de um sistema fluvial é uma proposta relativamente nova para modelar fácies fluvial, descrevendo o sistema fluvial em termos do arranjo tridimensional de unidades geomórficas, chamadas de Elementos Arquiteturais. Estes elementos são os blocos de edifício básico de todos os sistemas fluviais, formando "pacotes" de estratos geneticamente relacionados e definidos por suas geometria, composição das fácies e escala. São fisicamente separáveis por superfícies limitantes (Miall, 1985).

Fazendo-se uso de superfícies limitantes e associações de fácies, pode ser definida a hierarquia de unidades sedimentológicas tridimensionais (elementos arquiteturais). Cada um destes elementos representa um processo ou uma suíte particular dos processos que ocorre num determinado ponto do sistema deposicional. Miall (1985) propôs um conjunto de oito elementos arquiteturais que podem ser usados para descrever a arquitetura e arranjo espacial do sistema fluvial; permitindo, desta forma, a criação da arquitetura fluvial de forma objetiva, não forçando os dados a um modelo idealizado teórico.

Desde o final da década de 80, vários pesquisadores têm utilizado a proposta de Miall (1985, 1988a) e a partir dela foram desenvolvidos novos conceitos visando a melhor caracterização da arquitetura de depósitos fluviais. Dentre estes autores pode-se ressaltar Miall (1988b), Cowan (1991) e Bromley (1991). Nos últimos anos uma nova ferramenta foi incorporada o *Ground-Penetrating Radar (GPR)*, para análise tridimensional dos elementos arquiteturais dos depósitos fluviais (Corbeanu *et al.*, 2001).

Na Bacia Potiguar, Becker *et al.* (1992), Becker (1996) e Lanzarini (1995), desenvolveram estudos nos depósitos fluviais da Formação Açu (Unidade Açu-3), visando à caracterização da arquitetura de fácies e geometria nestes depósitos. Também utilizaram a metodologia definida por Miall (1985 e 1988a), Menezes & Lima Filho (2001), Poletto *et al.* (2002) e Menezes (2002).

Os elementos arquiteturais são caracterizados por uma associação de fácies típica e por uma geometria específica para cada elemento. Na descrição é empregada a classificação formulada por Miall (1978), que se fundamenta na caracterização dos aspectos litológicos dos depósitos. Nesta, estão embutidas as relações genéticas entre fácies e as condições hidrodinâmicas responsáveis pela sua deposição (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Litofácies associadas a depósitos aluviais segundo Miall (1978).

| Código da Fácies | Litofácies | Estruturas sedimentares | Interpretação |
|-------------------------|--|---|--|
| Gms | Maciço, com cascalho suportado por matriz | Agradacional | Depósitos de fluxo de detritos |
| Gm | Cascalho maciço ou pobremente acamadado | Acamamento horizontal, imbricação | Barras longitudinais, depósitos residuais, depósitos tipo peneira (<i>sieve</i>) |
| Gt | Cascalho estratificado | Estratificação cruzada acanalada | Preenchimento de canais |
| Gp | Cascalho estratificado | Estratificação cruzada planar | Barras longitudinais, crescimento deltáico de antigas barras remanescentes |
| St | Areia, média a muito grossa, podendo conter seixos | Estratificações cruzadas acanaladas isoladas ou agrupadas | Dunas (regime de fluxo inferior) |
| Sp | Areia, média a muito grossa, podendo conter seixos | Estratificações cruzadas planares isoladas ou agrupadas | Barras linguóides transversais e ondas-de-areia (regime de fluxo inferior) |
| Sr | Areia, muito fina a grossa | Marcas onduladas | Ondulações (regime de fluxo inferior) |
| Sh | Areia, muito fina a grossa, podendo conter seixos | Laminação horizontal, lineação de partição ou de fluxo | Fluxo acamado planar (regime de fluxo superior) |
| Sl | Areia, muito fina a grossa, podendo conter seixos | Estratificação cruzada de baixo ângulo (<10°) | Preenchimento de sulcos, erosão de topo de dunas, antidunas |
| Se | Sulcos erosionais com intraclastos | Estratificação cruzada incipiente | Preenchimento de sulco |
| Ss | Areia fina a muito grossa, podendo conter seixos | Sulcos largos e rasos | Preenchimento de sulco |
| Fl | Areia, silte, lama | Laminação fina, ondulações de amplitude muito pequena | Depósitos de transbordamento ou de decantação de enchentes |
| Fsc | Silte, lama | Laminada a maciça | Depósitos de áreas pantanosas |
| Fcf | Lama | Maciça, com moluscos de água doce | Depósitos de pântanos alagadiços |
| Fm | Lama, silte | Maciça, com gretas de contração (ressecação) | Depósitos de transbordamento |
| C | Carvão, lama carbonática | Vegetais, película de lama | Depósitos de pântano |
| P | Carbonatos | Feições pedogenéticas | Solos |

Para caracterização das unidades deposicionais Miall (1985, 1988a), adaptou a chamada Superfície Limitante, onde o autor caracteriza hierarquias para as superfícies variando de 1ª até 6ª ordens (figura 3.5). As seis superfícies limitantes idealizadas são caracterizadas por:

1ª ordem – Um limite de *set*, geralmente erosional para alguns graus, mas não cortam estratificações anteriores. São interpretadas como resultado das migrações das formas de leitos sob um regime de fluxo constante;

2ª ordem - Superfícies limitadas por *coset*, geralmente erosionais, são interpretadas como resultado de uma mudança nas condições de fluxo. As superfícies de 1ª e 2ª ordem representam níveis erosionais gerados em curtos intervalos de tempo;

3ª ordem – São superfícies erosionais, relacionadas a incrementos de macroformas, identificados por superfícies de reativação;

4ª ordem – Separa os blocos construtores do depósito fluvial, onde são individualizados os elementos arquiteturais;

5ª ordem – Esta ordem de hierarquia representa superfícies limitantes maiores que separam complexos de canais e lençóis de areias. Nestas superfícies podem ser individualizados cinturões de canais fluviais;

6ª ordem – Essa superfície apresenta grupos de cinturões de canais ou paleovales, mapeadas como unidades estratigráficas.

Miall (1996) subdividiu as unidades deposicionais em depósitos aluviais segundo 10 grupos, em função de sua dimensão física, razão de sedimentação e a escala de tempo do evento, onde cada grupo de unidade deposicional é limitado por um tipo de superfície limitante (tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Hierarquias das unidades deposicionais em depósitos aluviais (Miall, 1991).

| Grupo | Escala de tempo do processo | Exemplos ou processos | Razão de sedimentação instantânea (m/ka) | Unidades deposicionais fluviais e deltaicas | Hierarquia e características das superfícies limitantes |
|--------------|------------------------------------|---|---|--|--|
| 1 | 10^{-6} | Ciclos de <i>burst-sweep</i> | | Lâmina | 0ª ordem, superfície de laminação |
| 2 | $10^{-5} - 10^{-4}$ | Migração de formas de leitos | 10^5 | Marcas onduladas (microformas) | 1ª ordem, superfície limitante de <i>set</i> |
| 3 | 10^{-3} | Migração de formas de leitos | 10^5 | Incremento de dunas, reativação de superfície | 1ª ordem, superfície limitante de <i>set</i> |
| 4 | $10^{-2} - 10^{-1}$ | Migração de formas de leitos | 10^4 | Duna (macroforma) | 2ª ordem, superfície limitante de <i>coset</i> |
| 5 | $10^0 - 10^1$ | Eventos sazonais, inundações com recorrências de 10 anos | $10^2 - 10^3$ | Incremento de macroformas | 3ª ordem, mergulhos de 5 a 20° na direção da acresção |
| 6 | $10^2 - 10^3$ | Inundações (recorrências de 10 anos), migração das barras | $10^2 - 10^3$ | Macroformas (ex: barras em pontal) | 4ª ordem, convexo para cima, topo de macroformas |
| 7 | $10^3 - 10^4$ | Processos geomórficos longos | $10^0 - 10^1$ | Canal, lobo deltáico | 5ª ordem, base de canais |
| 8 | $10^4 - 10^5$ | Ciclos de 5ª ordem de Milankovitch | 10^{-1} | Seqüência de cinturões de canais | 6ª ordem, horizontalizado, extensão regionalizada |
| 9 | $10^5 - 10^6$ | Ciclos de 4ª ordem de Milankovitch | $10^{-1} - 10^{-2}$ | Sistema deposicional, leques aluviais, seqüência | 7ª ordem, horizontalizado, extensão regionalizada |
| 10 | $10^6 - 10^7$ | Ciclos de 3ª ordem de Milankovitch | $10^{-1} - 10^{-2}$ | Complexo de preenchimento de bacia | 8ª ordem, discordância regional |

Os oito elementos arquiteturais, caracterizados por Miall (1985, 1988a) são denominados de: canal (CH), forma de leito do tipo barras conglomeráticas (GB), depósitos de fluxo gravitacionais (SG), forma de leito arenosa (SB), macroforma de acreção frontal (DA), depósito de acreção lateral (LA), lençóis de areias laminadas (LS) e depósito de finos de planície de inundação (OF). Uma síntese desses elementos é mostrada na Tabela 3.3 e (figura 3.6).

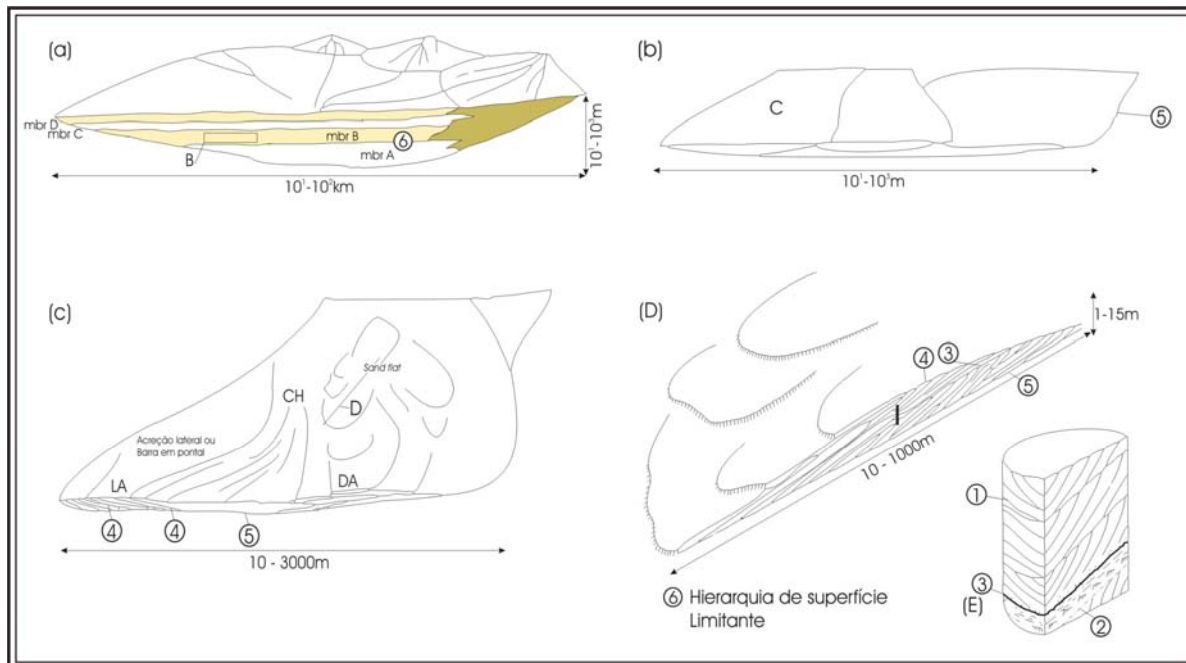


Figura 3.5 – Proposta das seis ordens de hierarquias de superfícies limitantes para depósitos fluviais. Diagrama A para E representa uma sucessiva ampliação de partes de uma unidade fluvial. Numa superfície de 6ª ordem é possível reconhecer superfícies de ordem menores. Segundo Miall (1988a).

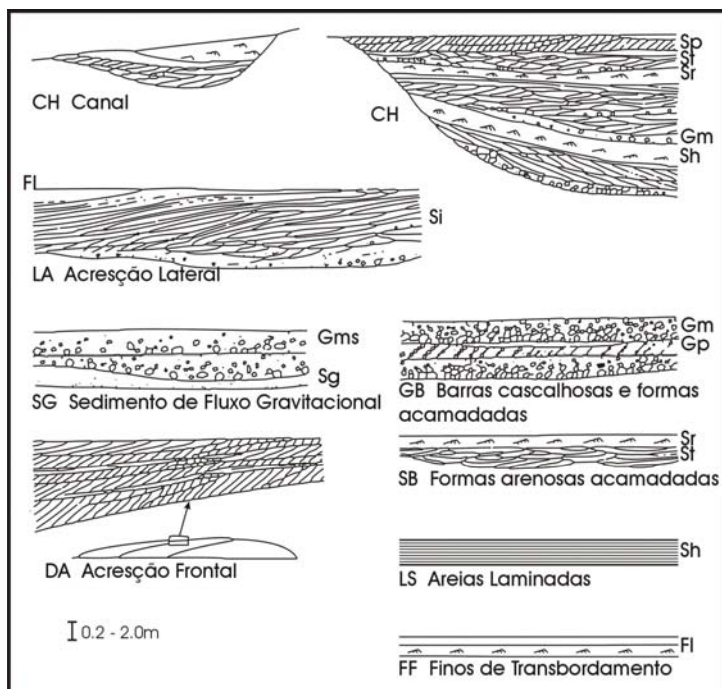


Figura 3.6 – A série de elementos arquiteturais dos depósitos fluviais, com códigos de litofácies de Miall (1978).

Tabela 3.3 – Síntese dos Elementos Arquiteturais de Depósitos Fluviais. Modificado de Miall (1985, 1988a).

| Elemento Arquitetural | Símbolo | Principais assembléias de Litofácies | Geometria e relacionamentos |
|--|----------------|---|---|
| Canais | CH | Várias combinações | Interdigitação, lente ou camadas; base erosional, côncava para cima; escala e forma altamente variáveis; superfícies internas de erosão secundárias côncavas para cima são comuns |
| Formas de leito tipo barras conglomeráticas | GB | Gm, Gp, Gt | Lente, lençol; corpos geralmente tabulares; geralmente interdigitado com SB |
| Formas de leito arenosas | SB | St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss | lente, camada, lençol, cunha; ocorre como preenchimento canal, <i>crevasses splay</i> s, topo da barras |
| Macroformas de acreção frontal | DA | St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss | Lente repousando em superfície plana ou base dos canais, com superfícies internas de segunda ordem convexas para cima e superfície limitantes superior |
| Depósitos de acreção lateral | LA | St, Sp, Sh, Sl, Se, Ss; sendo menos comum Gm, Gt e Gp | Cunha, camadas, lobo; caracterizado por superfícies internas de acreção lateral |
| Sedimento de fluxo gravitacional | SG | Gm, Gms | Lobo, camada; tipicamente interdigitados com GB |
| Lençóis de areia Laminados | LS | Sh, Sl; St menor proporção de, Sp, Sr | Camada e lençol |
| Depósitos finos de planície de inundação | OF | Fm, Fl | Lençóis finos a grossos; geralmente interdigitados com SB; pode preencher canais abandonados |

Com o método de Análise dos Elementos de Arquitetura, Miall (1985, 1996) apresenta 12 modelos para depósitos aluviais, os quais são definidos com base na geometria do canal e no arranjo tridimensional dos elementos arquiteturais. Os estilos fluviais definidos pelo autor são apresentados na figura 3.7.

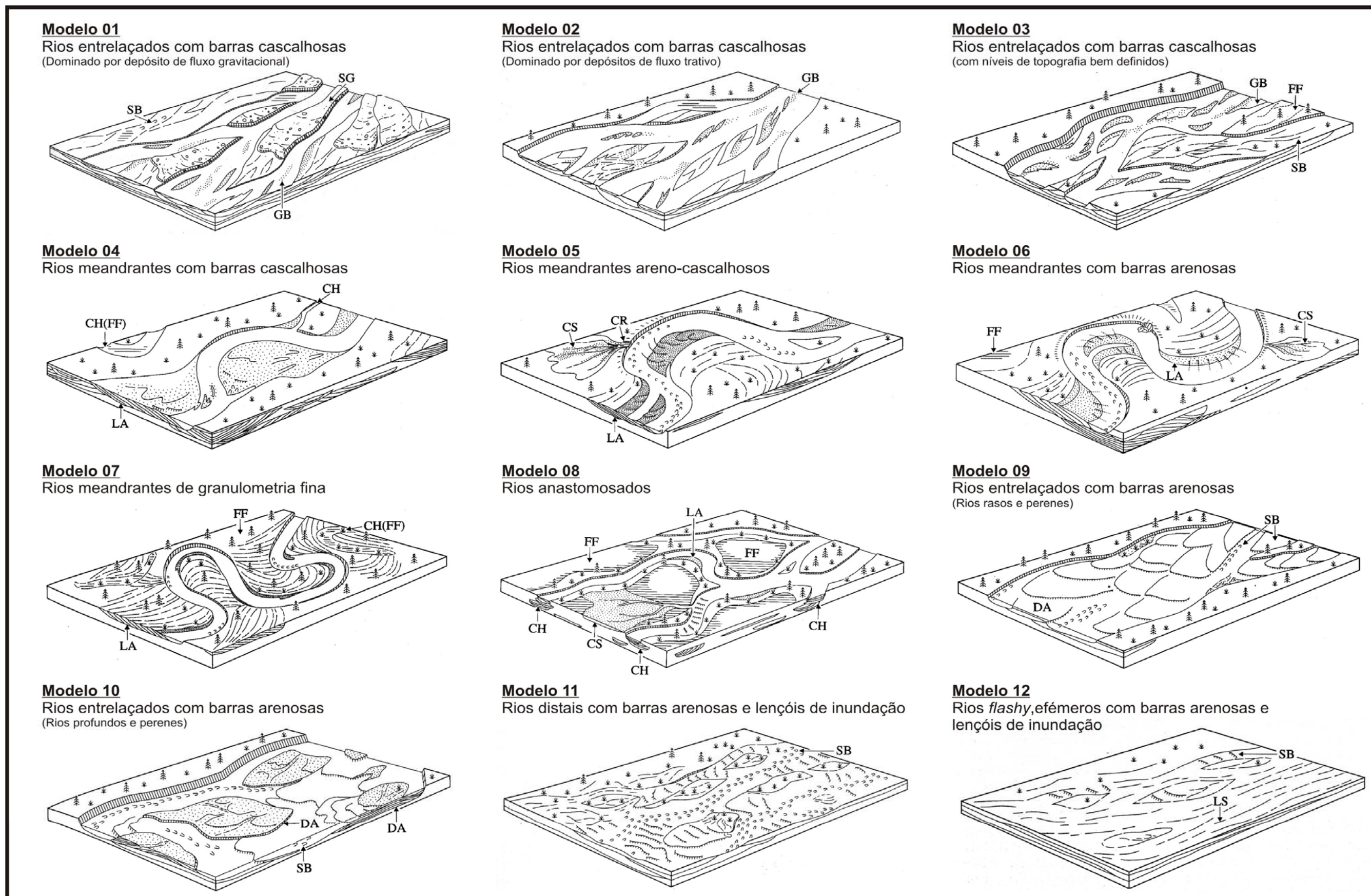


Figura 3.7 - Mapa geológico elaborado durante o reconhecimento regional onde são apresentados as associações de fácies interpretadas.

3.2 – RECONHECIMENTO REGIONAL

Esta etapa envolveu uma pesquisa em escala regional, a qual teve como objetivo principal a seleção de áreas para estudos mais detalhados. Os levantamentos de reconhecimento regional obtiveram como produto principal um mapa geológico na escala de 1:50.000, de uma área com aproximadamente 964 km², na porção sul da Bacia Potiguar. A área foi mapeada conjuntamente com alunos de graduação do Curso de Geologia da UFRN da Disciplina Geologia de Campo II, tendo como base imagens de sensores remotos (Landsat TM-7, STRM e fotografias aéreas).

As rotinas empregadas para o processamento das Imagens Landsat, foram desenvolvidas seguindo os mesmos procedimentos apresentado por Reyes-Pérez (2003). As imagens do satélite LANDSAT TM-7 utilizadas apresentam órbita/ponto 216/64 e 215/64 (obtidas em 13 de agosto de 1999 e em 21 de junho de 2000, respectivamente). Para o processamento digital de imagens satélite empregou-se a versão 4.0 SP do *software* ENVI e, para o registro das mesmas, foram utilizados pontos de controles, obtidos em cartas topográficas da SUDENE, na escala 1: 100 000. As composições coloridas RGB mais adequadas para a interpretação das diferentes litologias presentes na área foram: (i) a de “composição 752”, para ressaltar os depósitos recentes, os quais apresentam coloração mais clara e textura mais rugosa, e (ii) as de “composições 542 e 432”, com contraste de raiz quadrada, para proporcionou a delimitação de áreas do embasamento, de rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, e de rochas siliciclásticas da Formação Açú (Figura 3.8). Para melhorar a resolução espacial das composições RGB geradas foram realizadas transformações com componentes IHS utilizando a banda 8 (pancromática) com resolução de 15 metros.

Outro produto que contribuiu para delimitação da geologia foi o modelo digital do terreno, gerado com base nos dados do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). O SRTM foi um projeto realizado em conjunto entre dois órgãos do governo americano (Agencia Nacional de Imagem e Mapeamento - NIMA e a NASA), tendo também contribuição das agências espaciais do governo alemão e italiano. O objetivo dessa missão foi produzir o mais exato e completo dado topográfico digital da superfície da terra (entre as latitudes 60° norte e 56° sul) a partir do imageamento com um sistema de radar. Para geração de mapas topográficos digitais foi usada a técnica chamada de interferometria de radar, onde dois sensores, em posições distintas, adquirem imagens simultaneamente, e estas são combinadas para criar padrões de interferências. Com estes padrões são

geradas imagens tridimensionais da superfície da terra. Nesse projeto foram coletados todos os dados em uma única missão espacial com duração de 11 dias em fevereiro de 2000. O produto final dessa missão são *grids* altimétricos (disponíveis em vários formatos), com 90m de resolução espacial, com erro absoluto na vertical de 16 m. Todos os dados de elevação estão em metros e referenciados ao geóide WGS84 EGM96. O *datum* horizontal utilizado para este produto é o WGS 84. Os *grids* estão disponibilizados em coordenadas geográficas.

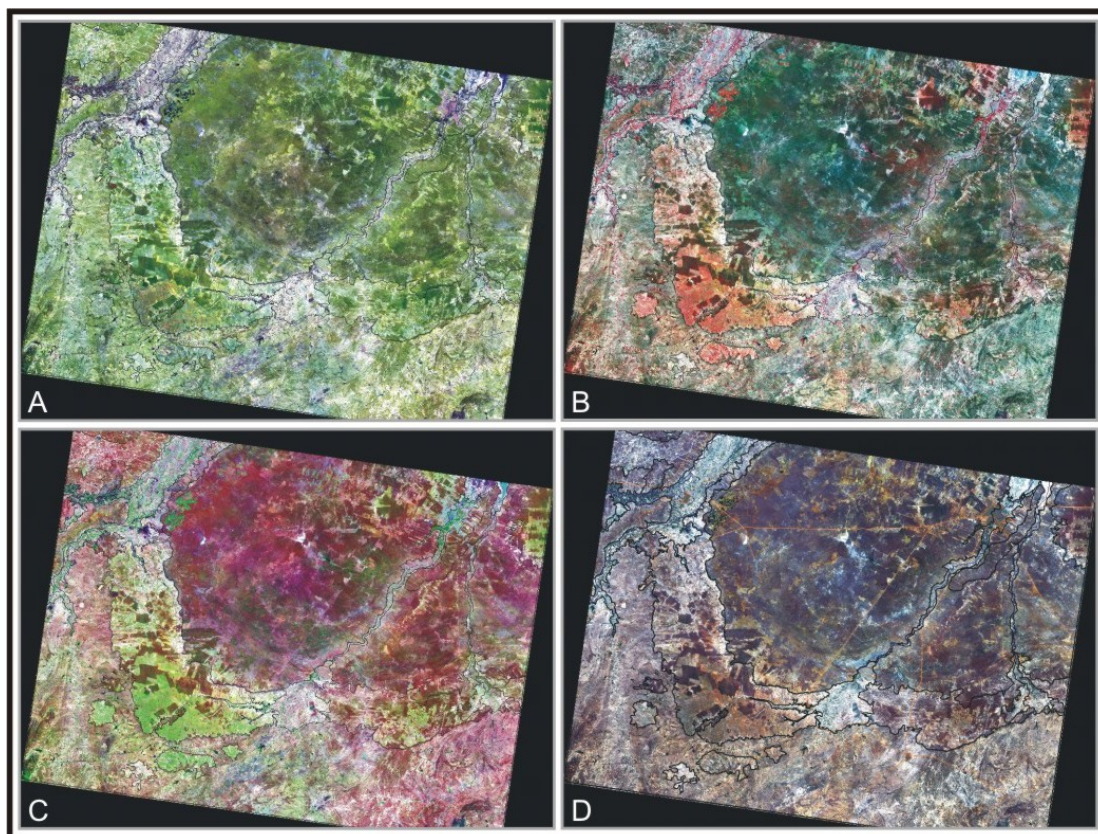


Figura 3.8 - Composições coloridas para a cena 216/64 com interpretação geológica: A) RGB (752), B) RGB (542), C) RGB (432), e D) RGB (321), modificado de Reyes-Pérez (2003).

No reconhecimento regional foram utilizados dados do SRTM, entre as latitudes 4° 20' e 6° 20' e as longitudes 35° 00' e 38° 15' (figura 3.9), os quais recobrem toda parte emersa da Bacia Potiguar, sendo estes adquiridos no site "ftp://edcscgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/South_America/" em 08/07/2003. Os arquivos de dados foram obtidos no formato *arcgrid* e posteriormente trabalhados nos programas ArcView® 8 e GoCad®2.0.8. No primeiro programa citado foram mudados os sistemas de coordenadas do *grid*, para o datum horizontal SAD69 e para a projeção UTM (Zona 24S).

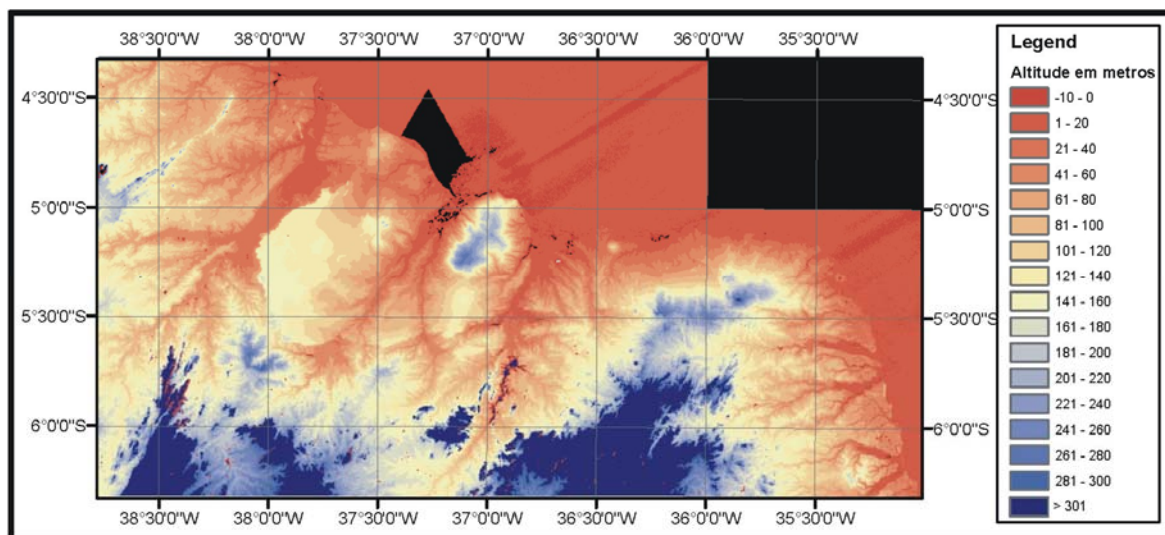


Figura 3.9 – Grid altimétrico englobando toda a parte emersa da Bacia Potiguar, adquirido do projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), partes pretas da imagem representam regiões com ausência de dados.

Em virtude da presença de áreas sem informação no SRTM (partes pretas na figura 3.9) e regiões a serem descartadas do *grid*, os dados do radar foram reprocessados no programa GoCad[®]. As informações do SRTM foram inseridas como um objeto de pontos a partir de um arquivo ASCII. Para geração deste arquivo foi utilizada a extensão *raster2XYZ* do ArcView[®]. O arquivo apresenta três colunas, onde cada linha representa as coordenadas Este e Norte, além do valor altimétrico de cada célula (*pixel*) do *grid*. No programa GoCad[®] foram geradas superfícies que representam modelos digitais do terreno (MDT's), inseridas imagens de satélites para sobrepor (*drape*) aos MDT's (figura 3.10). Mais informações sobre os procedimentos para geração de superfícies com *drape* de imagens no programa GoCad[®] serão disponibilizadas no capítulo 4.

O sistema empregado para traçar os limites geológicos foi a de digitação na tela do monitor, empregando o programa ArcView[®] 8. Na elaboração deste mapa, além das interpretações dos produtos antes descritos e das informações obtidas durante as etapas de campo, foram incorporados mapas previamente elaborados por estudantes e professores do Curso de Geologia da UFRN.

A área mapeada durante a fase de reconhecimento regional compreende partes dos Municípios de Upanema, Caraúbas e Assu, situados no Estado do Rio Grande do Norte. As principais vias de acesso à área são as BR-110, BR-304 e RN-117.

Na área mapeada foram caracterizados três sistemas deposicionais, representados por sistemas fluviais e estuarinos, correlacionados à Formação Açú (unidades Açú-3 e Açú-4, respectivamente), e sistemas de planície e canal de maré

carbonáticas (Formação Jandaíra). São também descritos na área depósitos de origem aluvial interpretados como paleocanais do Rio Assu.

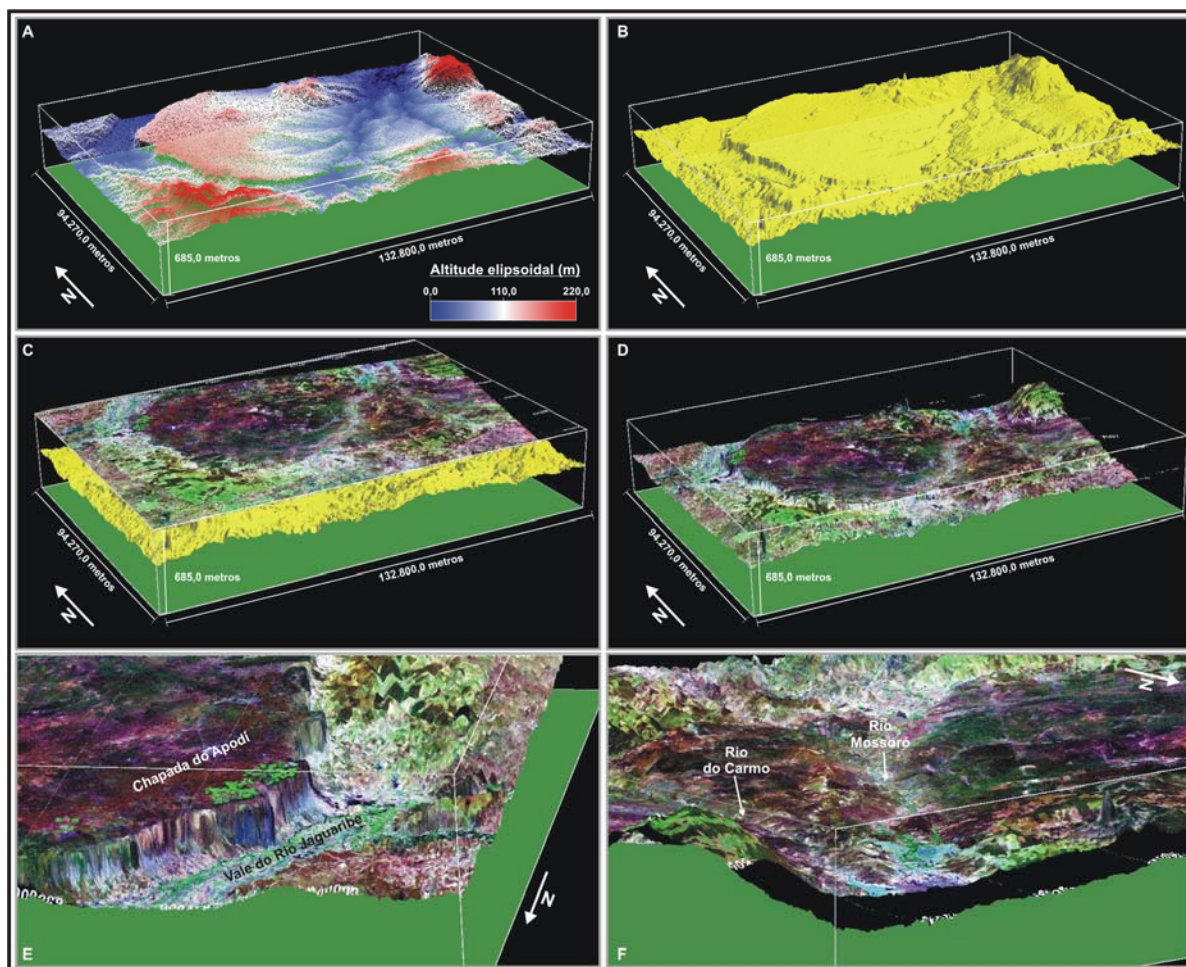


Figura 3.10 – Procedimentos realizados nos sensores remotos (SRTM e Landsat) no programa GoCad®, para auxiliar na delimitação da geologia; (A) Nuvens de pontos gerada a partir dos dados SRTM; (B) Superfície representando MDT's; (C) Georreferenciamento da imagem Landsat; (D) Drape da imagem de satélite na superfície; (E e F) Detalhes do produto gerado.

Os depósitos fluviais identificados durante o reconhecimento regional foram compartimentados em dois grupos de associação de fácies: (i) depósitos de preenchimento de canal e (ii) depósitos de planície de inundação. No mapa litofaciológico gerado foram segmentadas áreas onde predominam um tipo específico de associação. As fácies de preenchimento de canal são representados predominantemente por arenitos grossos a muito grossos, são encontrados também conglomerados e arenitos médios e finos com estratificação cruzada acanalada. Subordinadamente, os arenitos ocorrem também com estratificação cruzada tabular e maciços, associados aos litótipos de preenchimento de canal. Os depósitos de planície de inundação são caracterizados por pacotes de lamitos intercalados com arenitos finos a médios. Uma descrição detalhada sobre as fácies fluviais da Unidade Açú-3 será abordada no item a seguir.

No sistema estuarino foram encontrados lamitos, argilitos, arenitos e conglomerados, com predominância das fácies areno-argilosas. Os corpos arenosos apresentam estratificações cruzadas, ocorrendo também como corpos maciços. Os litótipos pelíticos mostram-se bastante alterados e caracterizados por pacotes lenticulares com espessuras bastante variadas. Uma particularidade dos conglomerados descritos neste sistema é grande concentração de clastos de argila. A presença de camadas de arenitos com estratificações cruzadas mostrando seqüência de *tidal bundles* e presença de outras estruturas do tipo *mud couplets*, *flaser*, marcas onduladas reversas são diagnósticos da influência da ação de correntes de maré nestes depósitos.

Wackestones e *mudstones* com estruturas *birdeyes* e gretas de contração, diagnósticas de depósitos de supramaré são os representantes do sistema de planície de maré. *Grainstones* e *Packstones* ricos em bioclastos com estratificação cruzadas de médio a grande porte foram interpretados como barras de maré. Nestas rochas carbonáticas foram identificadas seqüências de *tidal bundles* e estrutura do tipo *mud couplets*, o que possibilitou caracteriza-las como depósitos de inframaré.

Na figura 3.11 é apresentado o mapa litofaciológico com a distribuição das associações de fácies características para cada sistema deposicional.

3.3 - CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA

A descrição faciológica das rochas siliciclásticas da Unidade Açú-3 que afloram na área selecionada fundamentou-se principalmente nas características mesoscópicas (cor, textura, estruturas sedimentares e geometria dos pacotes). Foi também descrita, quando possível, a composição mineralógica. Dados de paleocorrentes foram obtidos nas litofácies arenosas de preenchimento de canal.

Com base neste estudo e seguindo a proposta de Miall (1978), foi possível individualizar 7 litofácies principais: (i) *Conglomerados arenosos com estratificações cruzadas* (**Gt**); (ii) *Arenitos grossos a conglomeráticos com estratificações cruzadas isoladas* (**St_(i)**); (iii) *Arenitos grossos a conglomeráticos com estratificações cruzadas agrupadas* (**St_(a)**); (iv) *Arenitos médios a grossos fluidizados* (**St_(f)**); (v) *Arenitos médios a grossos maciços* (**Sh**); (vi) *Arenitos finos, Folhelhos e Argilitos* (**Fl**), e (vii) *Argilitos e Folhelhos* (**Fm**). As descrições e interpretações sedimentológicas encontram-se sumarizadas nas planilhas a seguir.

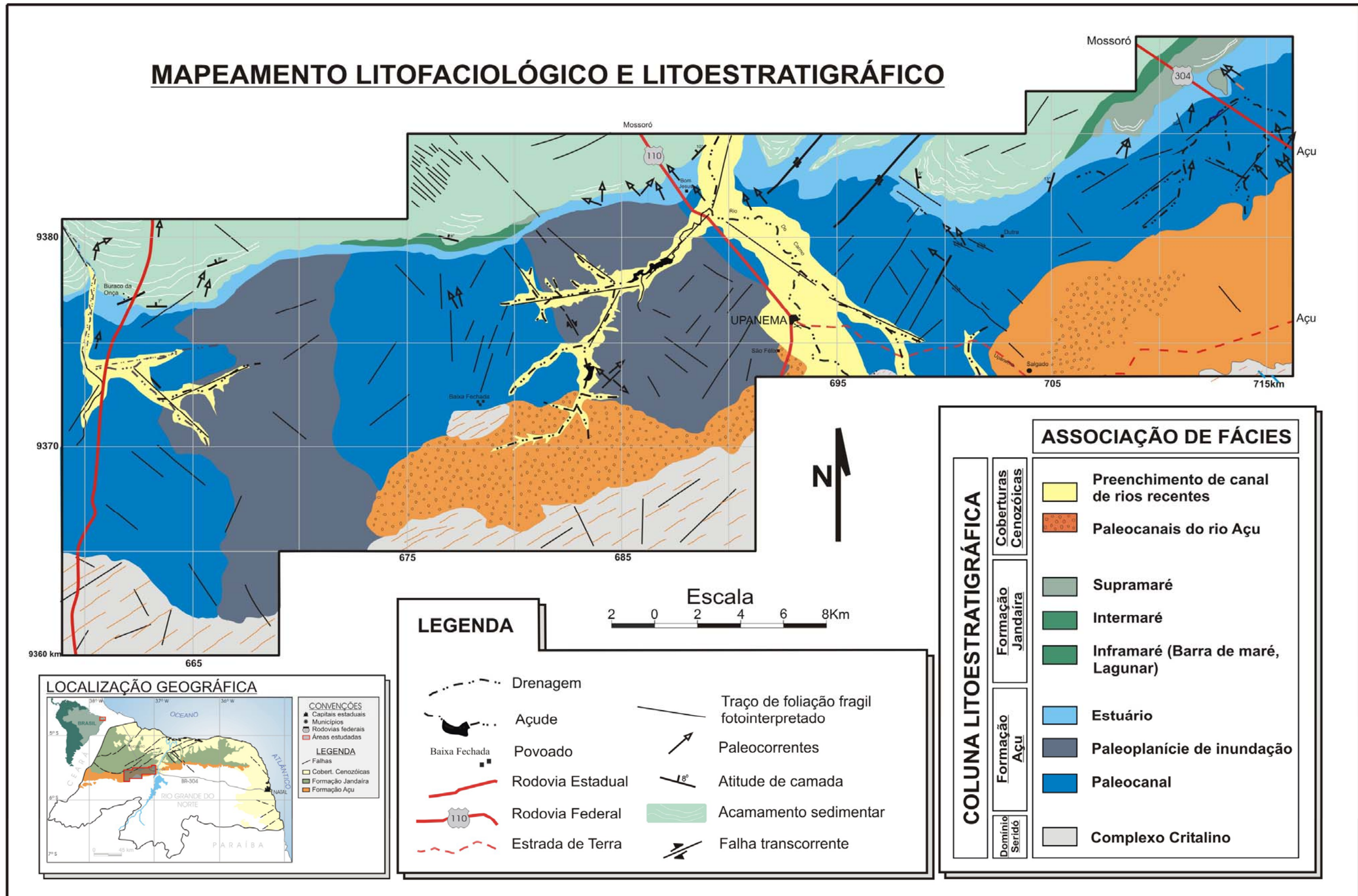


Figura 3.11 - Mapa geológico elaborado durante o reconhecimento regional onde são apresentadas as associações de fácies interpretadas.

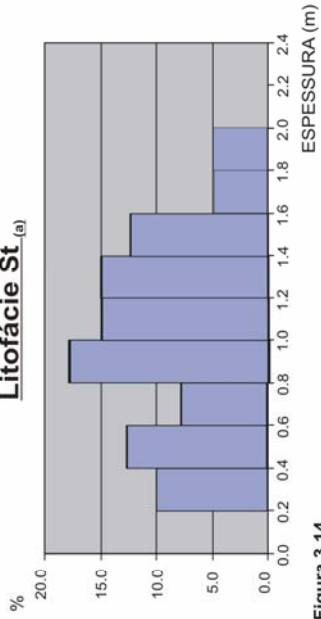


Planilha 1 - Conglomerados arenosos com estratificações cruzadas - Gt

| | | |
|--|--|--------------------|
| <p>Descrição geral - Conglomerados sustentados por matriz arenosa, com cores em tons branco-acinzentados, contendo estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande porte, ocorrem também com estrutura maciça.</p> | <p>Ocorrência - Esta litofácies ocorre sempre associada à litofácies St(I), ocupando preferencialmente os níveis mais basais das macroformas de preenchimento de canal. Apresenta espessuras variando de 0,4 a 1,5m e extensão lateral na ordem de poucas dezenas de metros.</p> | <p>Figura 3.12</p> |
| <p>Aspectos composicionais – Composta por clastos de quartzo e feldspatos, com tamanhos variando de 1 a 5cm, sendo ainda observados fragmentos de rochas de gnaisses e granitos, menores que 5 cm, são comuns também a presença de grandes clastos de pelitos, podendo estes atingir até 15 cm de diâmetro.</p> | <p>Interpretação - Esta litofácies foram interpretadas como típicos depósitos lag de canal. Representando a parte basal de uma seqüência completa de grano decrescência ascendente.</p> | <p>Foto 3.1</p> |
| <p>Aspectos texturais – Apresenta baixa maturidade textural e mineralógica, evidenciada pela presença de seixos angulosos a subangulosos, baixa esfericidade e grande quantidade de clastos de feldspatos e argilitos.</p> | <p>Figura 3.12 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácies Gt; Foto 3.1 - Contato entre as litofácies Fl e Gt, sendo observado na base da litofácies Gt grandes clastos de pelitos. Nível basal da seção BP/A-3/1g; Foto 3.2 - Detalhe da textura da litofácies Gt, onde são observados seixos e grãos imaturos de quartzo, feldspatos e fragmentos de rocha. Afloramento BP/A-3/14</p> | <p>Foto 3.2</p> |

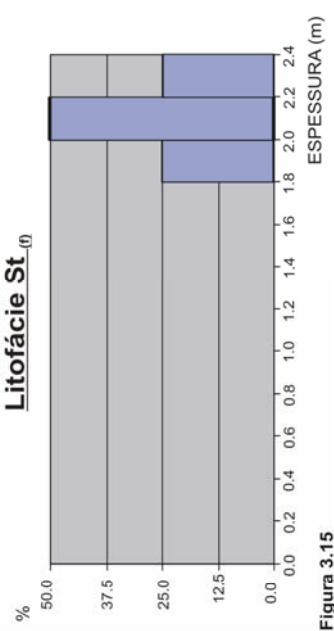


Planilha 2 - Arenitos grossos a conglomeráticos com estratificações cruzadas isoladas - St(i)

| | | |
|---|--|--|
| <p>Descrição geral - Arenitos grossos a muito grossos, com seixos dispersos, localmente, com níveis conglomeráticos, contendo estratificações cruzadas acanaladas de grande porte.</p> | <p>Ocorrência - Esta litofácies possui espessuras que variam de 0,3 a 2,2m. Sua continuidade lateral em cortes transversais varia de metros a poucas dezenas de metros, mas em cortes longitudinais são de difícil observação, extrapolando os limites dos afloramentos e podendo apresentar centenas de metros.</p> | <p>Litofácies St_(i)</p> <p>Figura 3.13</p> |
| <p>Aspectos composicionais – Quartzo predomina em seu, porém com menor frequência ocorrem feldspatos, foram também observados a presença de clastos de argila menores que 3cm. Os seixos dispersos e os níveis de arenitos conglomeráticos apresentam a mesma textura e composição que os encontrados nos conglomerados do fácies Gt</p> | <p>Interpretação - A litofácies St (i) foi interpretada com produto da deposição de grandes formas de leito de crista sinuosa, geradas em eventos episódicos de inundações.</p> | <p>Foto 3.3</p> |
| <p>Aspectos texturais – São pobremente selecionados e texturalmente imaturos, apresentam grãos angulosos a sub-angulosos com baixa esfericidade.</p> | <p>Figura 3.13 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácies ST(i); Foto 3.3 - Amalgamento de litofácies ST(i) apresentando estratificações acanaladas de grande porte, afloramento BP/A-3/2; Foto 3.4 - Camada da litofácies ST(i) apresentando estratificações cruzadas de grande porte BP/A-3/14.</p> | <p>Foto 3.4</p> |

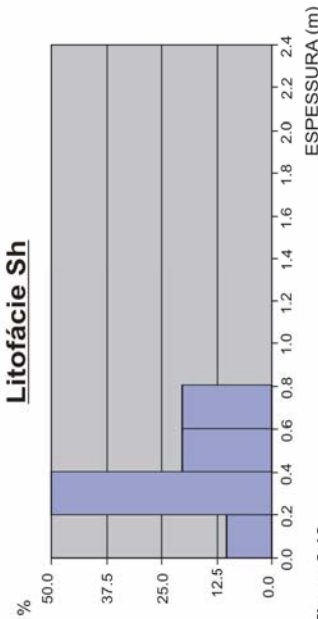


Planilha 3 - Arenitos grossos a muito grossos com estratificações cruzadas agrupadas - St(a)

| | | |
|---|---|--|
| <p>Descrição geral - Arenitos grossos a muito grossos com seixos dispersos, representado por cosets possuindo múltiplas estratificações cruzadas agrupadas, de pequeno a médio porte. Os limites dos sets são marcados por superfícies erosivas pouco expressivas, superfícies limites de segunda ordem.</p> | <p>Ocorrência - Nesta litofácies os coset apresenta geometria tabular, gerada pelo amalgamento das formas de leito 3D de pequeno a médio porte, os coset apresenta espessuras variando de 0,3 a 2,0m. As múltiplas estratificações cruzadas de pequeno a médio porte, contidas no interior dos cosets, apresentam espessuras de 15 a 40cm.</p> |  <p>Figura 3.14</p> |
| <p>Aspectos composicionais – Os grãos do arcabouço são constituído predominantemente de quartzo, com grãos de felpatos ocorrendo subordinadamente.</p> | <p>Interpretação - A geração deste litotipos estão relacionados ao retrabalhamento de depósitos de preenchimento de canal, a partir de mudanças na orientação e regime de fluxo, durante um evento de sedimentação contínua.</p> |  <p>Foto 3.5</p> |
| <p>Aspectos texturais – Apresenta características texturais bastante similares às encontradas na litofácies St(i), diferenciando-se desta pela menor quantidade de seixos dispersos.</p> | <p>Figura 3.14 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácies St(a); Foto 3.5 - Litofácies St(a) em corte longitudinal ao fluxo da corrente apresentando vários sets com estratificação cruzada, afloramento BP/A-3/1; Foto 3.6 - Litofácies St(a) mostrando detalhe de set com estratificação cruzada tangencial na base apresentando estratificações cruzadas de grande porte BP/A-3/3.</p> |  <p>Foto 3.6</p> |

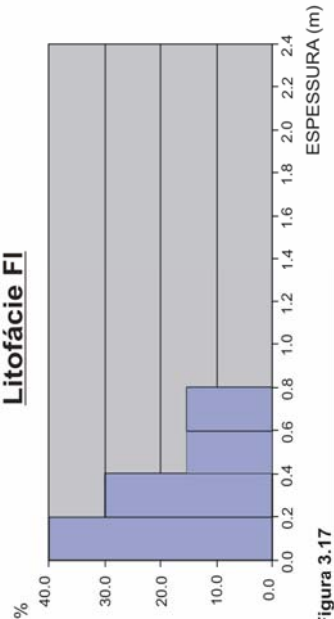
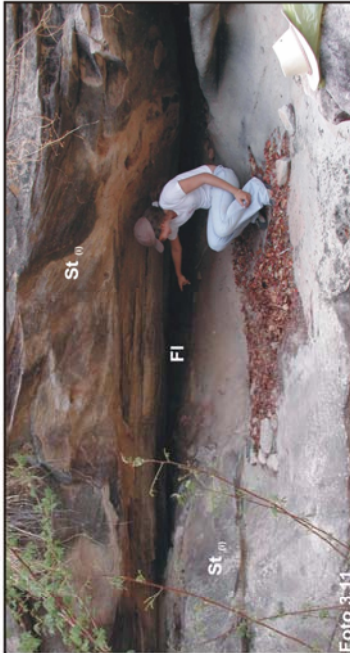

Planilha 4 - Arenitos médios a grossos fluidizados - St(f)

| | | |
|--|--|--|
| <p>Descrição geral - Arenitos médios a grossos, maciços, contendo seixos dispersos e níveis conglomeráticos.</p> | <p>Ocorrência - Esta litofácies ocorre de forma restrita na área, sendo descrita apenas no afloramento BP/A-3/09 (km 98 da BR-304), apresentando-se com espessura de média de 2 metros.</p> |  <p>Litofácies St_(f)</p> <p>Figura 3.15</p> |
| <p>Aspectos composicionais – Os grãos do arcabouço são representados predominantemente de quartzo, ocorrendo grãos de feldspatos e fragmentos de rocha de forma subordinada, como observadas nas litofácies St(i) e St(a), diferenciando-se destas pela menor quantidade de seixos dispersos e ausência de clastos de argilas</p> | <p>Interpretação - A formação desta litofácies encontra-se relacionada aos mesmos processos responsáveis pela deposição da litofácies St(i) e St(a). No entanto, as estruturas sedimentares pretéritas provavelmente foram destruídas por processos de fluidização.</p> |  <p>Foto 3.7</p> |
| <p>Aspectos texturais – As características texturais, também apresentam bastante similaridade às encontradas nas litofácies St(i) e St(a), formados por grãos e seixos angulosos a sub-angulosos.</p> | <p>Figura 3.15 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácies St(f); Foto 3.7 - Pacote de Arenito grosso a muito grosso maciço da litofácies St(f), afloramento BP/A-3/9 (km 98 da BR-304); Foto 3.8 - Detalhe do arenito da litofácies St(f), contendo poucos seixos dispersos menores que dois centímetros, com ausência de estruturas sedimentares.</p> |  <p>Foto 3.8</p> |

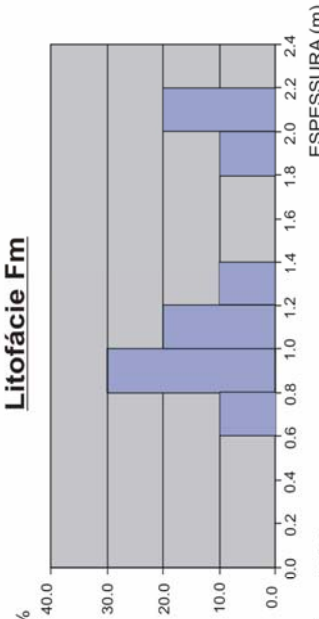

Planilha 5 - Arenitos médios a grossos predominantemente maciços - Sh

| <p>Descrição geral - Arenitos médios, maciços ou com estratificações cruzadas incipientes. Predominam cores com tons esbranquiçados, exibindo pseudo-estratificações (liesegang).</p> | <p>Ocorrência - Possuem espessura inferior a 0,7m, predominando camadas com 0,2 a 0,4m, e continuidade lateral de cerca de dezenas de metros. Esta litofácies ocorre sempre no fechamento das litofácies de preenchimento de canal, associada principalmente com as litofácies St(i), St(a), e sobrepostas a estas litofácies repousam as litofácies Fm de acreção vertical.</p> |  <p>Litofácies Sh</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Espessura (m)</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,0 - 0,2</td> <td>50,0</td> </tr> <tr> <td>0,2 - 0,4</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>0,4 - 0,6</td> <td>25,0</td> </tr> <tr> <td>0,6 - 0,8</td> <td>12,5</td> </tr> <tr> <td>0,8 - 1,0</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>1,0 - 1,2</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>1,2 - 1,4</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>1,4 - 1,6</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>1,6 - 1,8</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>1,8 - 2,0</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>2,0 - 2,2</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>2,2 - 2,4</td> <td>0,0</td> </tr> </tbody> </table> <p>Figura 3.16</p> | Espessura (m) | % | 0,0 - 0,2 | 50,0 | 0,2 - 0,4 | 37,5 | 0,4 - 0,6 | 25,0 | 0,6 - 0,8 | 12,5 | 0,8 - 1,0 | 0,0 | 1,0 - 1,2 | 0,0 | 1,2 - 1,4 | 0,0 | 1,4 - 1,6 | 0,0 | 1,6 - 1,8 | 0,0 | 1,8 - 2,0 | 0,0 | 2,0 - 2,2 | 0,0 | 2,2 - 2,4 | 0,0 |
|--|--|---|---------------|---|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|
| Espessura (m) | % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,0 - 0,2 | 50,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,2 - 0,4 | 37,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,4 - 0,6 | 25,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,6 - 0,8 | 12,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,8 - 1,0 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 - 1,2 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,2 - 1,4 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,4 - 1,6 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,6 - 1,8 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,8 - 2,0 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,0 - 2,2 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,2 - 2,4 | 0,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Aspectos composicionais – Os constituintes mais frequentes são os grãos de quartzo, com grãos de feldspatos ocorrendo de forma subordinada.</p> | <p>Interpretação - Esta litofácies possivelmente pode estar relacionada a depósitos de diques marginais.</p> |  <p>Foto 3.9</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Aspectos texturais – Esta litofácies apresenta o melhor selecionamento em comparação com as outras litofácies descritas, possuindo a melhor muridade textural.</p> | <p>Figura 3.16 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácies Sh; Foto 3.9 - Associação de litofácies com posicionamento da Litofácies Sh entre as litofácies de preenchimento de canal e os depósitos de acreção vertical, Afloramento BP/A-3/9; Foto 3.10 - Detalhe do arenito da litofácies Sh, exibindo pseudoestratificações (liesengangs) Afloramento BP/A-3/9.</p> |  <p>Foto 3.10</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Planilha 6 - Arenitos finos, Folhelhos e Argilitos - FI

| | | |
|--|---|--|
| <p>Descrição geral - São representados por Arenitos finos, siltitos e lamitos avermelhados, com estrutura maciça ou laminada nas frações pelíticas, porém ocorrem estratificações plano-paralelas e de baixo ângulo nas frações arenosas.</p> | <p>Ocorrência - Apresenta-se pouco espessa com valores menores que 70cm e continuidade lateral da ordem de poucas dezenas de metros. O limite superior é marcado por contatos erosivos, interpretados como superfícies limitantes de 5º ordem.</p> |  <p>Figura 3.17</p> |
| <p>Aspectos composicionais –</p> | <p>Interpretação - Estes pelitos foram interpretados como produto de uma sedimentação ocorrida em canais secundários inativos ou de baixa energia, dentro do cinturão de canais, gerados durante regimes de baixa energia do rio, possivelmente, relacionados a períodos de estiagem.</p> |  <p>Foto 3.11</p> |
| <p>Aspectos texturais –</p> | <p>Figura 3.17 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácia FI; Foto 3.11 - Lente de lamito da litofácia FI de pouca continuidade lateral associada com litofácies de arenosas de preenchimento de canal, Afloramento BP/A-3/3; Foto 3.12 - Detalhe do lamito apresentado na foto 3.11.</p> |  <p>Foto 3.12</p> |

Planilha 7 - Argilitos e Folhelhos - Fm

| | | |
|---|---|---|
| <p>Descrição geral - Lamitos e argilitos, de cor vermelha escuro, predominando estrutura maciça. Localmente, observam-se gretas de contração e bioturbações.</p> | <p>Ocorrência - Os pacotes desta fácies mostram geometria tabular, possuindo espessuras que variam de 0,8 a 2,5m e extensa continuidade lateral, podendo ser rastreado entre os afloramentos, numa distância de mais de 1,5km.</p> | <p>Interpretação - Esta litofácies foram associadas a depósitos de acreção vertical, típicos de planície de inundação.</p> |
| <p>Aspectos composicionais –</p> | <p>Aspectos texturais –</p> |  <p>Litofácies Fm</p> <p>ESPESSURA (m)</p> <p>Figura 3.18</p> |
| <p>Figura 3.18 - Histograma com a distribuição das espessuras da litofácies Fm; Foto 3.13 - Pacote de lamito bastante alterado da litofácies Fm, com grande continuidade lateral, seu topo é marcado por superfície limitante de 5a ordem, com o desenvolvimento de um novo ciclo fluvial. Afloramento BP/A</p> |  <p>Litofácies de preenchimento de canal</p> <p>Fm</p> <p>Superfície limitante de 5a ordem</p> <p>Litofácies de preenchimento de canal</p> <p>Foto 3.14</p> | |

Os dados de paleocorrentes foram obtidos exclusivamente nas fácies $St_{(i)}$ e $St_{(a)}$ de preenchimento de canal, a partir de afloramentos com grande exposição em planta, onde ocorrem formas de leito 3D (com crista sinuosa) (figura 3.19), diminuindo, desta forma, a dispersão gerada pelas medidas de paleocorrentes aparente, adquiridas em cortes verticais e em outras formas de leito de menor porte.

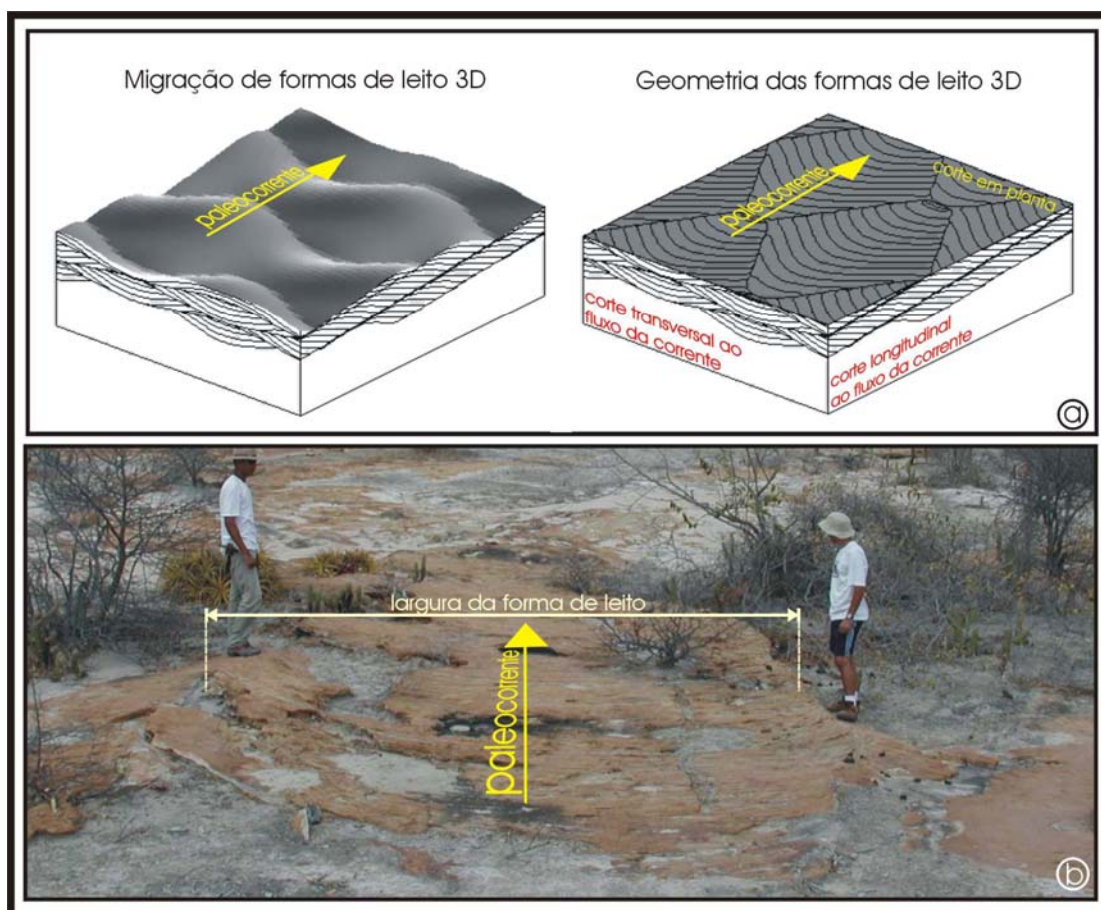


Figura 3.19 – Esquema apresentando como foram medidas as paleocorrentes. (a) Blocos diagramas mostrando a migração e geometria (em corte horizontal, transversal e longitudinal) de formas de leito 3D, Programa Bedform (Rubin, 1987). (b) Geometria das formas de leito 3D vista em planta, com definição dos parâmetros medidos em campo, afloramento BP/A-3/05.

Os dados de paleocorrentes foram medidos diretamente nos afloramentos ou, indiretamente, por meio de fotografias aéreas de pequeno formato (FAPEF's).

Foram realizados dois levantamentos aereofotográficos para aquisição das FAPEF's, sendo o primeiro executado num monomotor (modelo Sertanejo da Embraer), na escala aproximada de 1: 1.000 (figura 3.20a), com o objetivo principal de localizar e delimitar os afloramentos com grande exposição em planta. O segundo, realizado numa aeronave tipo "Ultraleve", em áreas previamente selecionadas, com escala aproximada de 1:500 (figura 3.20b), que teve como finalidade obter dados de sentido, migração e largura das formas de leito. Os dois

levantamentos foram executados, com máquina fotográfica SLR 35mm, por integrantes do GEA.

Para obtenção das medidas indiretas de paleocorrentes, foram realizados trabalhos de “rasterização” nas FAPEF’s para, posteriormente, serem geoprocessadas e medidas as paleocorrentes. Concomitante aos trabalhos de medição das paleocorrentes, também foi obtida a variabilidade das larguras das formas de leito 3D (figura 3.19).

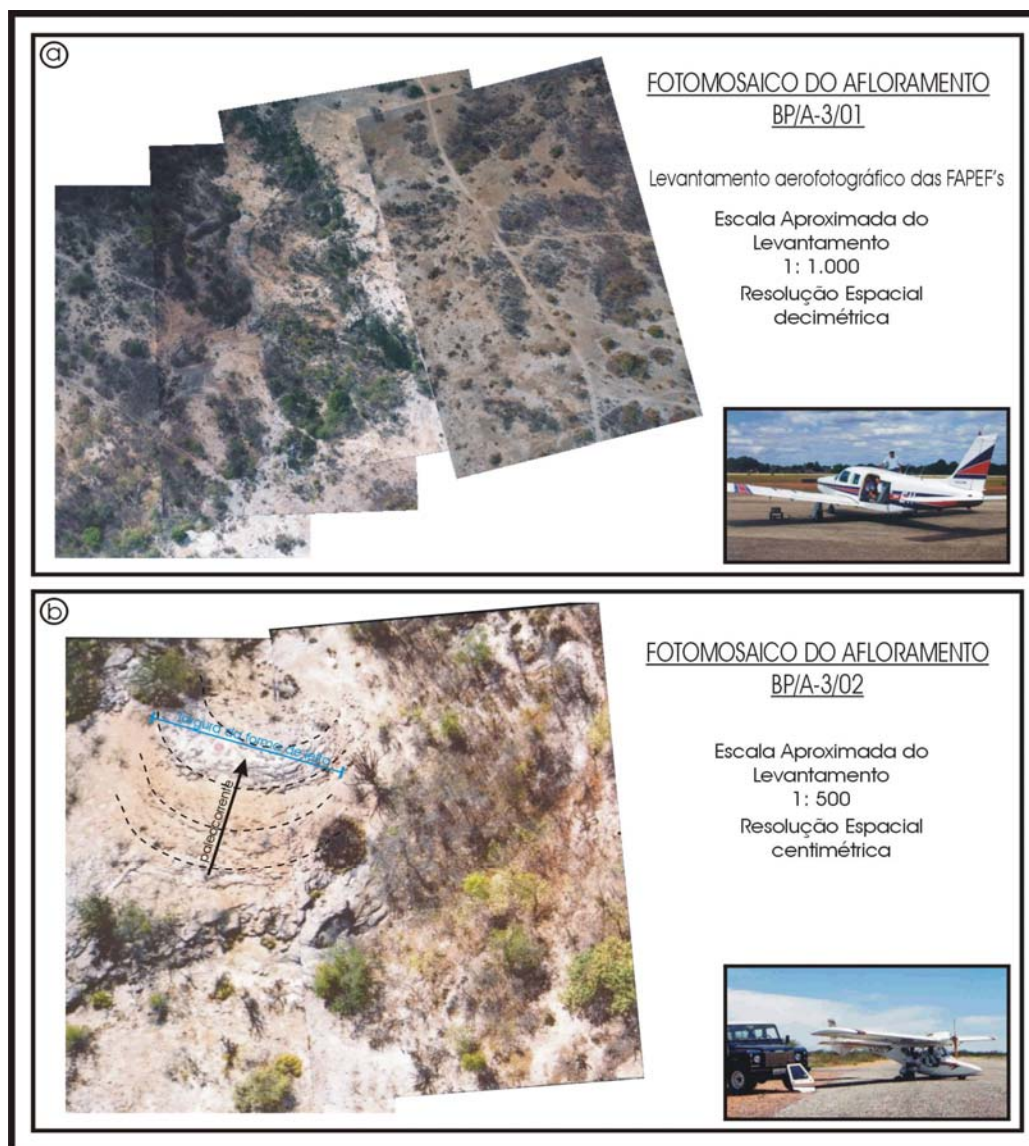


Figura 3.20 – Fotomosaicos das fotografias aéreas de pequeno formato (FAPEF's), nas duas escalas levantadas. (a) Fotomosaico mostrando afloramento BP/A-3/01. (b) Fotomosaico de parte do afloramento BP/A-3/02, em detalhe observa-se a geometria em planta e sentido da paleocorrente da forma de leito 3D.

Seguindo esta sistemática, foram adquiridas medidas de paleocorrentes em 8 afloramentos, perfazendo uma população de 326 medidas, além de aquisições isoladas realizadas em afloramentos com pouca expressão. As paleocorrentes apresentam uma direção preferencial para o quadrante noroeste (figura 3.21).

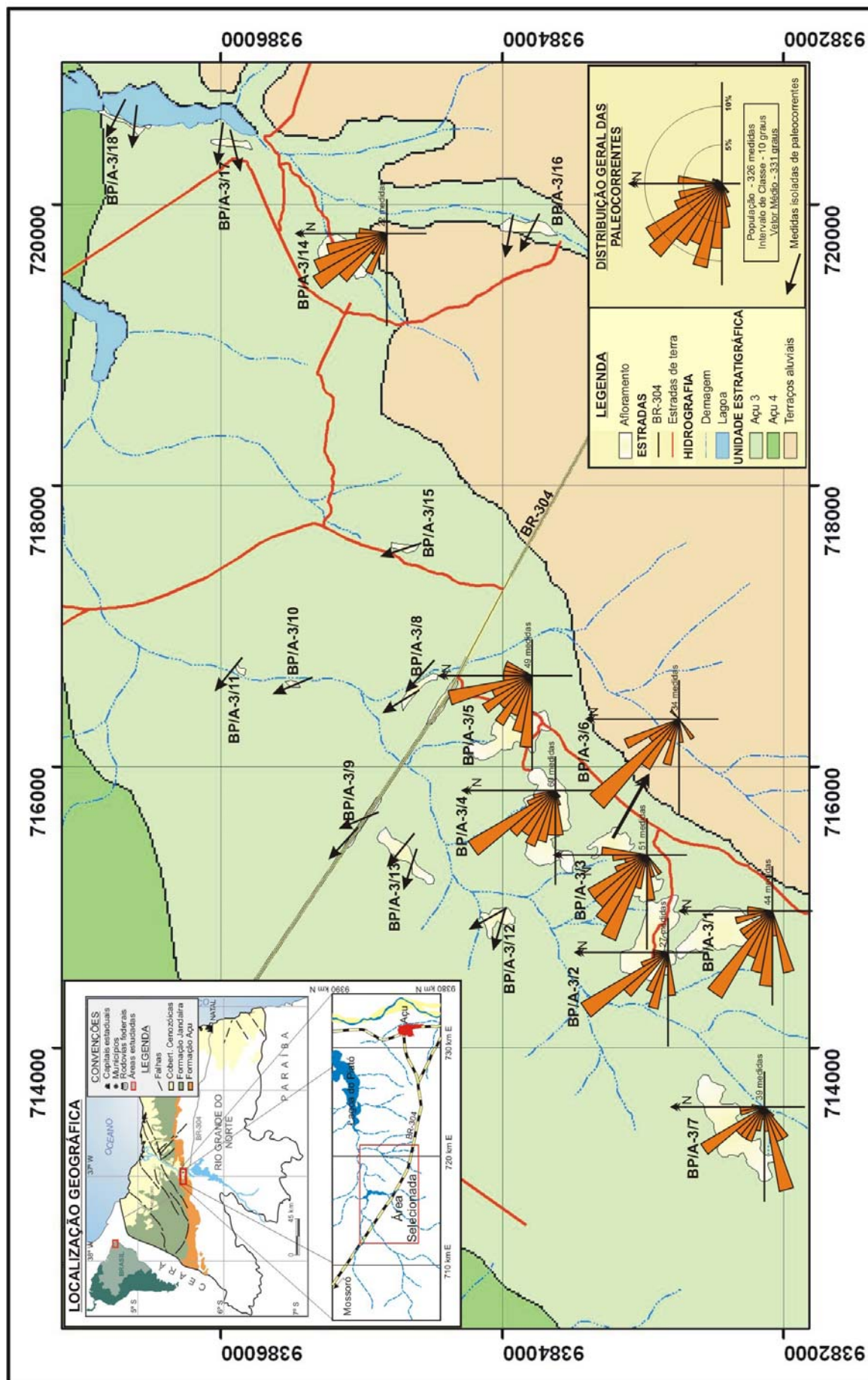


Figura 3.21 - Mapa de distribuição de paleocorrentes mostrando a tendência para NW.

3.3 – SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

A procura por uma definição consensual na literatura disponível para o SIG é sem dúvida uma tarefa exaustiva, porém elucidativa. Uma definição satisfatória pode ser dada como sendo um sistema baseado em computador, que permite ao usuário coletar, armazenar, manusear e analisar dados georreferenciados. Pode ser visto como uma combinação de *hardware*, *software*, dados, metodologias e recursos humanos, que operam de forma harmônica para produzir e analisar informação geográfica (Teixeira *et al.* 1997).

A rápida expansão dos SIG's está relacionada aos avanços da área de computação e de sua grande versatilidade e potencial para a solução de problemas de análise nas mais diversas aplicações temáticas, como estudos de uso da terra, topografia, geologia, análise ambiental, clima, solos, entre outros (Teixeira, 1992).

O SIG desenvolvido neste trabalho permitiu uma melhor análise e correlação entre os afloramentos, dentro de um domínio tridimensional. No SIG estão presentes todos os sensores remotos e os dados obtidos em campo, referente a etapa de mapeamento para elaboração da arquitetura deposicional. Na tabela 3.4 estão representados os temas contidos no SIG.

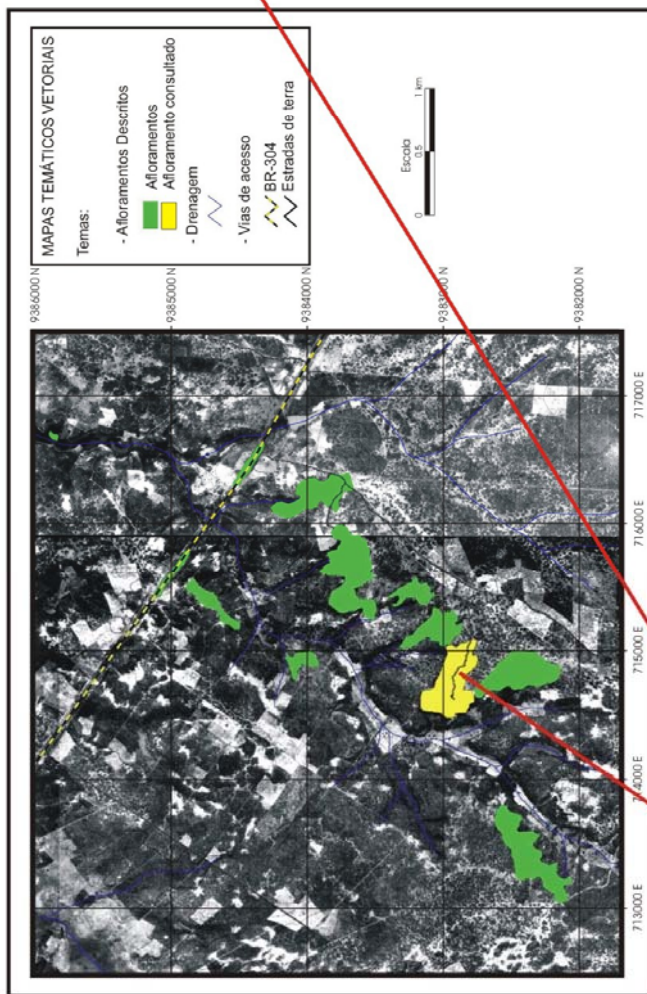
Tabela 3.4 – Síntese das entidades temáticas presentes no SIG.

| NOME DO TEMA | TIPO | Obs: |
|--|-------------------------------|---|
| Geologia | Vetorial (polígono) | Delimitação das unidades deposicionais |
| Afloramento | Vetorial (polígono) | Limites dos afloramentos |
| Perfil faciológico | Vetorial (ponto) | Localização das seções colunares |
| Vias de acesso | Vetorial (Linha) | Distribuição da BR-304 e das principais estradas de terra |
| RGB (542) | <i>Raster</i> (LandSat) | Utilizado para delimitar as unidades deposicionais, os afloramentos e vias de acesso. |
| Ikonos | <i>Raster</i> (Ikonos) | |
| 097407, 097408, 097409, 097417, 097418 e 097419 | <i>Raster</i> (Ortofotocarta) | Fornecimento da topografia |
| TIN | Vetorial (Triangulação) | Modelo Digital do Terreno (MDT) |

Os temas **Perfil faciológico** e **Afloramento** são os que apresentam os dados adquiridos nos afloramentos, onde estes dados são apresentados a partir de tabelas de atributos dos respectivos temas.

No tema **Afloramento** estão reunidas todas as informações gerais e ferramentas utilizadas na descrição dos afloramentos, bem como os dados paleocorrentes e largura das formas de leito (figura 3.22).

Banco de Dados Georreferenciado



(b)

Tabela secundária de atributos

| AFLORAMENTO | LARGURA DA FORMA DE LEITO (m) | PALEOCORRENTE (Az) |
|-------------|-------------------------------|--------------------|
| BP/A-3/02 | 9,00 | 270 |
| BP/A-3/02 | 2,20 | 285 |
| BP/A-3/02 | 1,30 | 290 |
| BP/A-3/02 | 0,75 | 330 |
| BP/A-3/02 | 4,30 | 265 |
| BP/A-3/02 | 0,80 | 315 |
| BP/A-3/06 | 1,00 | 45 |
| BP/A-3/06 | 1,62 | 320 |
| BP/A-3/06 | 0,68 | 315 |
| BP/A-3/06 | 0,93 | 290 |
| BP/A-3/06 | 6,60 | 328 |
| BP/A-3/06 | 1,05 | 316 |
| BP/A-3/06 | 1,57 | 312 |
| BP/A-3/06 | 4,93 | 316 |

(a)

Tabela principal de atributos

| AFLORAMENTO | BACIA | FORMAÇÃO | SIST. DEPOSICIONAL | UTM N | UTM E | ÁREA (m ²) | FAPEP's | DADOS EM PLANTA | PERFIL FACIOLÓGICO | GPR | SONDAGEM RASA |
|-------------|----------|----------|--------------------|---------|--------|------------------------|---------|-----------------|--------------------|-----|---------------|
| BP/A-3/01 | POTIGUAR | AÇU-3 | FLUVIAL | 9382334 | 713426 | 144902 | SIM | SIM | SIM | NÃO | NÃO |
| BP/A-3/02 | POTIGUAR | AÇU-3 | FLUVIAL | 9382451 | 714823 | 126633 | SIM | SIM | SIM | NÃO | NÃO |
| BP/A-3/03 | POTIGUAR | AÇU-3 | FLUVIAL | 9382953 | 714785 | 144934 | SIM | SIM | SIM | NÃO | NÃO |
| BP/A-3/04 | POTIGUAR | AÇU-3 | FLUVIAL | 9383084 | 715178 | 69981 | SIM | SIM | SIM | NÃO | NÃO |
| BP/A-3/05 | POTIGUAR | AÇU-3 | FLUVIAL | 9383228 | 715458 | 336358 | NÃO | SIM | NÃO | NÃO | NÃO |

Figura 3.22 - Apresentação da estrutura do banco de dados montado para armazenar os dados obtidos nos afloramentos análogos. (a) Tabela principal de atributos do tema afloramento. (b) Tabela secundária de atributos do tema afloramento.

Os dados adquiridos com o levantamento das seções colunares estão agrupados no tema **Perfil Faciológico**. Neste, estão presentes as associações de fácies descritas em cada seção colunar, as espessuras de cada litofácies e dos canais (figura 3.23).

Os Modelos Digitais de Terreno (MDT's) consistem na representação digital de uma porção da superfície terrestre. A sua estrutura de dados pode ser representada em dois tipos de modelos: Grade Retangular de Pontos (GRID) ou Rede Irregular de Triângulos (TIN). O modelo TIN consiste numa representação topológica de dados vetoriais, na qual os pontos de coordenadas tridimensionais, X,Y (localização geográfica) e Z (elevação), são ligados por linhas formando triângulos de tamanho irregular não sobrepostos (Simão & Carvalho, 2002).

Na elaboração do MDT da área foram utilizados os dados altimétricos de seis ortofotocartas, folhas 097407, 097408, 097409, 097417, 097418 e 097419 (INCRA-RN/ITERN/SUDENE, 1991), na escala de 1:10.000, com curvas de níveis de 10 em 10 metros. Realizou-se nestas cartas os trabalhos de rasterização e vetorização.

A rasterização foi realizada em *scanner* de rolo, onde foram geradas imagens com resolução de 300 dpi. Para vetorização das curvas de níveis e pontos cotados utilizou-se o *software* R2V, sendo primeiro georreferenciadas as ortofotocartas e, posteriormente, vetorizadas. O produto final da vetorização foi armazenado num arquivo com formato (*.dxf), com os dados X,Y e Z da topografia da área. A partir dos dados de altimetria da área, criou-se o MDT usando o modelo topológico TIN, sendo este gerado por meio da extensão 3D Analyst do *software* ArcView.

Com base no MDT foram atribuídos os componentes Z (altitudes) aos temas vetoriais criados, contribuindo desta forma para uma maior correlação entre os dados adquiridos em campo.

O banco de dados espacial gerado é dinâmico, podendo ser continuamente atualizado à medida que novos dados forem adquiridos. Consultas a base de dados podem ser feitas e visualizadas espacialmente a partir do SIG.

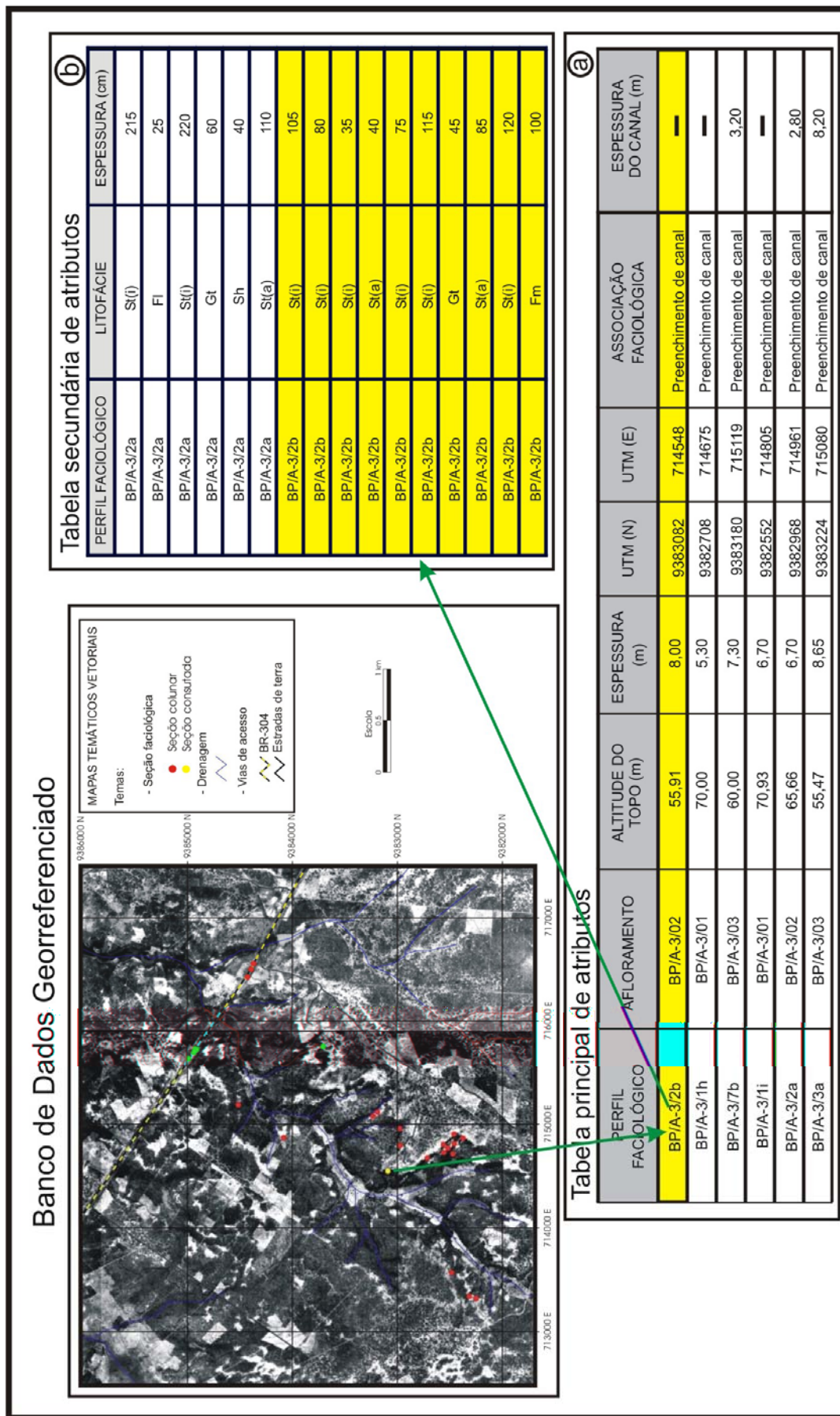


Figura 3.23 - Apresentação da estrutura dbase de dados adquiridas no levantamento de seções colunares. (a) Tabela principal de atributos do tema perfil faciologico. (b) Tabela secundária de atributos do tema perfil faciologico.

3.4 – ARQUITETURA FLUVIAL DA UNIDADE AÇU-3

Com base na descrição e interpretação das associações das litofácies descritas foi possível elaborar um modelo paleogeográfico para a área de estudo (Figura 3.24). Este modelo idealizado é representado como um sistema fluvial meandrante de granulometria grossa com baixa sinuosidade, como proposto por Lanzarini (1995). São aqui apresentadas pequenas adaptações a esta proposta que, por sua vez, foi baseada no trabalho de Brown *et al.* (1973). Um outro modelo de fácies que se pode correlacionar com o proposto para Unidade Açú-3 é o modelo 5 de Miall (1996), contudo apresentando baixa sinuosidade.

A partir do empilhamento vertical das litofácies e da correlação das mesmas nos vários afloramentos foi possível individualizar 3 ciclos fluviais, separados por superfícies limitantes de 5ª ordem. Tais ciclos são predominantemente arenosos, com granodecrescência ascendente, culminando em depósitos de planície de inundação, com grande continuidade lateral. Os ciclos ocorrem em grande extensão, extrapolando os limites dos afloramentos estudados, e apresentam espessuras da ordem de 9 a 15m. Estes ciclos foram interpretados como alociclos, tendo a sua origem relacionada à mudanças do nível de base e/ou climáticas. O fotomosaico do afloramento BP/A-3/14, mostrado na figura 3.25, apresenta a associação de fácies de preenchimento de canal com a distribuição das paleocorrentes de um dos ciclos fluviais.

Nos depósitos de preenchimento de canais são caracterizados ciclos menores, normalmente incompletos, formados por corpos predominantemente arenosos, amalgamados e limitados por superfícies de 4ª ordem (figura 3.25). Estes depósitos estão representados pela associação das fácies Gt, St_(i), St_(a), Sh, Sf e Fl em um arranjo de granodecrescência ascendente.

Estes ciclos exibem geometria de canal com alta razão largura/profundidade. Em sucessões completas apresentam espessuras variando de 1,5 a 8m e continuidade lateral na ordem de centenas de metros. Contudo, as espessuras maiores podem representar o empilhamento de canais com ciclos incompletos, os quais não podem ser diferenciados no afloramento. Estes ciclos fluviais menores podem ser classificados como autociclos, com sua origem relacionada às reativações do canal fluvial, causadas por variações sazonais.

As litofácies Fm e Fl representam eventuais barreiras de fluxo de fluido nos reservatórios. Foram identificados 2 pacotes de lamitos da litofácies Fm, possuindo grande continuidade lateral. Rastreados ao longo dos afloramentos, ocorrem como dois níveis com espessuras variando entre 1,6 a 2,4m (figura 3.24C). A fácies Fl

representa heterogeneidades com pequena continuidade lateral, ocorrendo dentro dos ciclos fluviais de menor ordem, com uma distribuição não bem definida, chamada informalmente de “folhelhos estocásticos”.

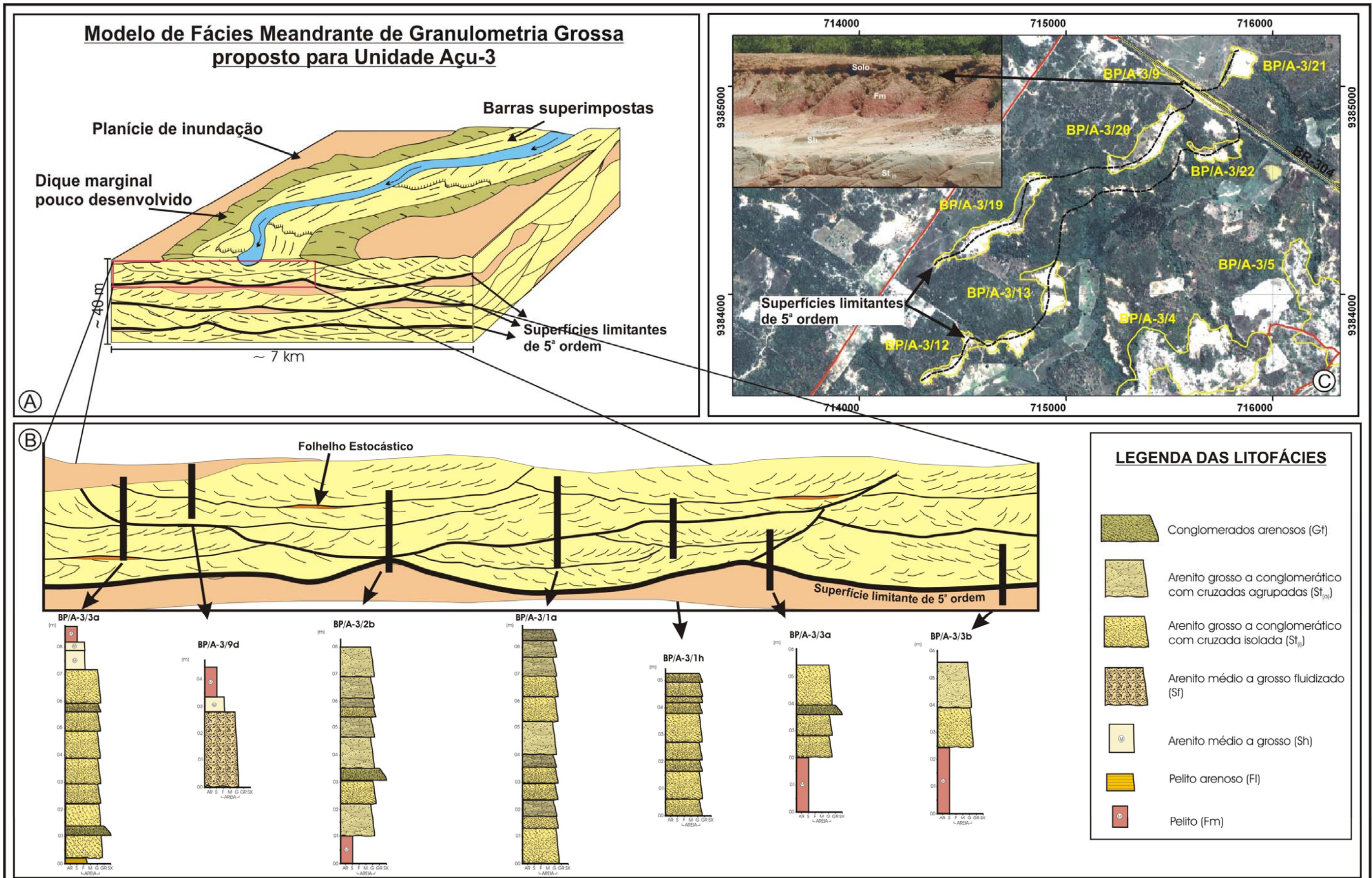


Figura 3.24 - (A) Modelo paleogeográfico idealizado para unidade estudada (modificado de Lanzarini, 1995), (B) Distribuição esquemática das Seções colunares levantadas nos afloramentos em um detalhe do modelo, (C) Correlação entre afloramentos com caracterização das superfícies limitantes de 5ª ordem com base em imagem Ikonos.

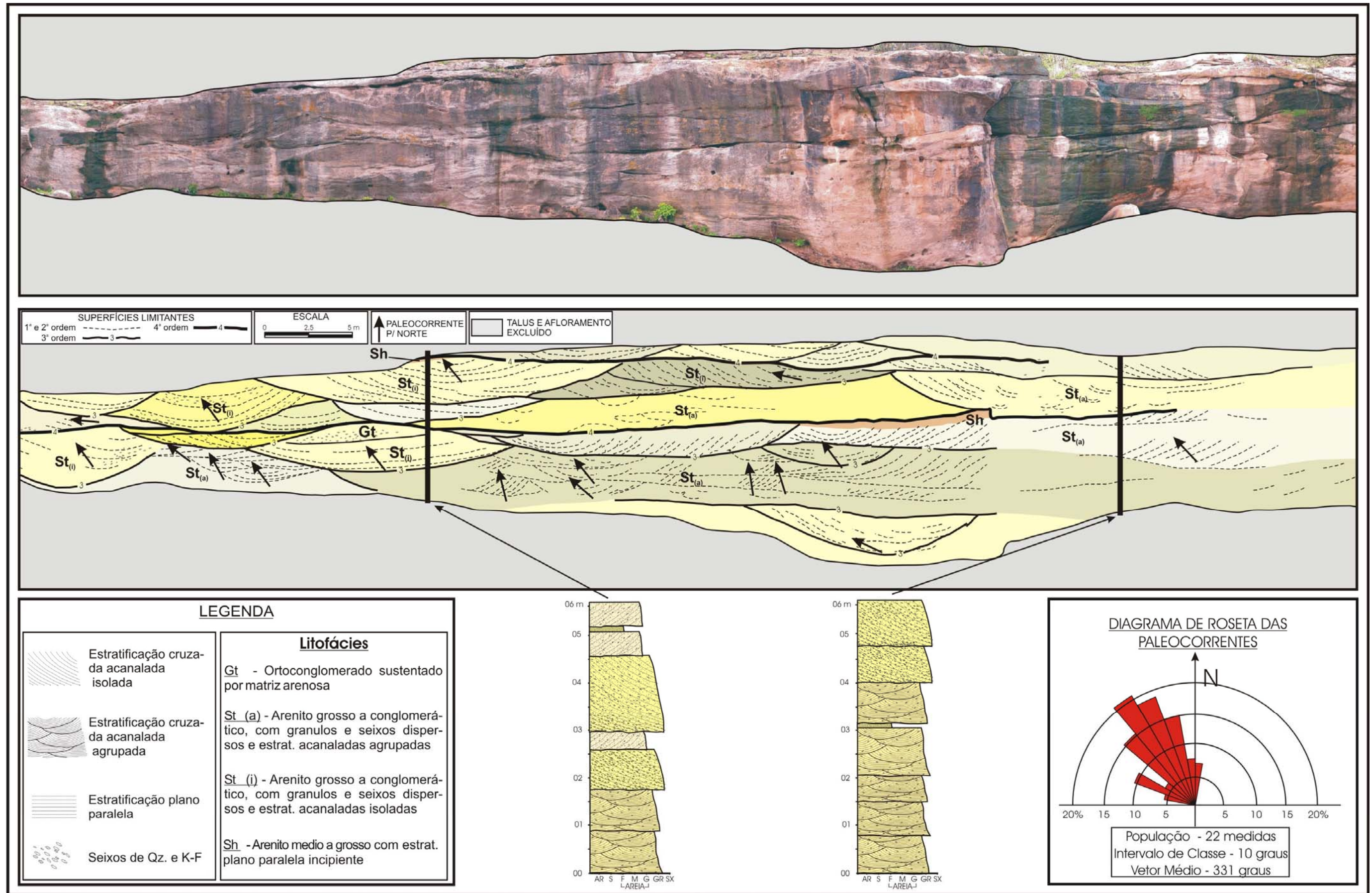


Figura 3.25 - Fotomosaico do afloramento BP/A-3/14, com interpretação das superfícies limitantes, distribuição das paleocorrentes e associação faciológica.

A revolução tecnológica alcançada nas duas últimas décadas, principalmente nas áreas da informática e da eletrônica, foi responsável pela evolução de equipamentos de medição utilizados nas Ciências da Terra. Durante este período observou-se a gradativa substituição de instrumentos de campo, como teodolitos e níveis óticos, por equipamentos tecnologicamente mais avançados e precisos, como exemplos encontram-se os seguintes equipamentos: Estação Total, Nível a Laser, Distanciômetro eletrônico, o GPS e o Laser Scanner.

A utilização dessas novas tecnologias integradas a dados geofísicos (GPR) e técnicas de visualização 3D tem permitido, aos geólogos, a interpretação mais precisa dos diversos sistemas deposicionais, a partir da construção de modelos tridimensionais de depósitos análogos a reservatórios de petróleo. Esta técnica de integração, denominada nesta dissertação de Mapeamento Digital, vem sendo usada para obter dados geológicos quantitativos dentro de um arranjo tridimensional, os quais são empregados como análogos na predição de incertezas em reservatórios de petróleo.

No Mapeamento Digital dos análogos estudados nesta dissertação foram integrados dados sedimentológicos, levantamentos topográficos de detalhe com Estação Total, posicionamento de precisão com GPS Geodésico, imageamento 3D com a técnica *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e fotomosaicos digitais de alta resolução, além de dados da subsuperfície rasa a partir do *Ground Penetration Radar* (GPR). Para integração destes dados e modelamento 3D dos análogos foi utilizado o programa GoCad®.

Neste trabalho foi modelado o afloramento BP/A-3/14, localizado a noroeste da área de trabalho selecionada (figura 1c e 3.25) e parte de uma barra de acreção oblíqua, por meio de uma malha de 200x200 metros no aluvião do Rio Assu, localizada próximo a cidade de Assu (figura 1d).

O afloramento BP/A-3/14 foi escolhido em função de sua grande exposição em corte, por sua riqueza de estruturas sedimentares, boa qualidade da geometria deposicional exposta e por ser de fácil acesso para o emprego das técnicas anteriormente citadas. Neste afloramento foram individualizadas 4 litofácies: Conglomerados arenosos (Gt), Arenito grosso a muito grossos com cruzada isolada ($St_{(i)}$), Arenito grosso a muito grossos com cruzadas agrupadas ($St_{(a)}$) e Arenito médio a grosso (Sh), com predominância das litofácies $St_{(i)}$ e $St_{(a)}$. Esta associação representa típicos depósitos de preenchimento de canal, caracterizados por múltiplos elementos arquiteturais amalgamados, onde foram identificadas as

seguintes unidades genéticas: Barras de acreção frontal (DA), barras de acreção lateral (LA) e canais secundários (CH). No afloramento BP/A-3/14 foram também individualizadas superfícies limitantes de 1ª a 4ª ordens. Uma representação do afloramento é mostrada na figura 3.25.

O Rio Assu foi aqui considerado como análogo recente, seguindo a tendência iniciada por diversos pesquisadores. Becker (1996) fez analogias entre as barras expostas no leito do Rio Assu e as litofácies de preenchimento de canal encontradas na Formação Açú. Castro (1993) estudando o sistema deposicional do Membro Mossoró (Formação Açú), apresenta uma relação entre o modelo deposicional deste membro com o estuário do Rio Assu. Menezes & Lima Filho (2001), Menezes (2002), Lima Filho *et. al* (2002) e Poletto *et al.* (2002) consideraram este rio como análogo quanto a sinuosidade e obtiveram valores da variabilidade da sinuosidade do canal do Rio Assu para gerar modelos estocásticos de reservatórios fluviais da Formação Açú. Gauw (2004) realiza o primeiro trabalho de caracterização faciológica e análise morfodinâmica para os depósitos do Rio Assu, mostrando a grande similaridade entre as fácies do rio com as rochas da Unidade Açú-3. Com isso, estudos que visem a obtenção da geometria de corpos sedimentares no Rio Assu, como proposto no presente trabalho, principalmente aquelas que não podem ser caracterizadas nos afloramentos, representam uma evolução no conhecimento das heterogeneidades dos depósitos fluviais da Formação Açú.

Neste capítulo serão descritas as ferramentas e técnicas utilizadas para a construção dos modelos digitais dos análogos. Será apresentada ainda uma síntese sobre cada ferramenta e como esta foi aplicada no trabalho.

4.1 – GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

O sistema GPS (*Global Positioning System*) foi desenvolvido pelo *U.S. Department of Defense* (DoD) e representa a junção de dois programas militares o *Naval Research Laboratory – TIMATION programe* e o *Air Force – 621B Project*. Apesar do sistema GPS ter sido desenvolvido e ser mantido pelo DoD com objetivos militares, o seu grande potencial para aplicações civis fez com que o Congresso Americano ordenasse ao DoD que promovesse o seu uso civil, que se iniciou em 1982. Desde então, desenvolveu-se rapidamente com aplicações do sistema em levantamentos geodésicos e sistemas de navegação.

O sistema GPS foi projetado de forma que o usuário em qualquer parte do mundo tenha disponibilidade durante 24 horas do dia a precisão métrica (modo

absoluto) e a sub-centimétrica (correção diferencial). O princípio básico usado no sistema GPS consiste na transmissão de sinais eletrônicos pelos satélites, por meio de ondas eletromagnéticas, e na captação desses sinais por receptores, de tal forma que o intervalo de tempo decorrido no percurso possa ser determinado. Sabendo o tempo de percurso e a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (velocidade da luz), as distâncias entre os satélites e o receptor que os rastreia podem ser calculadas, o que permite determinar as coordenadas da posição onde foi estacionado o receptor.

O sistema, também chamado de NAVSTAR (*Navigation Satellite Time And Ranging*) divide-se em três segmentos: espacial, de controle e do usuário (figura 4.1).



Figura 4.1 – Segmentos do sistema GPS. Modificado da Trimble (1997a).

O segmento espacial é representado por uma constelação de 25 satélites (24 operando e um de reserva) distribuídos em 6 planos orbitais distintos (com órbita de 20.183 km), com inclinação de 55° em relação a Linha do Equador e um período de revolução de 12 horas siderais. Este segmento é responsável pela geração e transmissão dos sinais GPS (códigos, portadoras e mensagens de navegação).

O segmento de controle tem por finalidade o monitoramento do sistema GPS a partir da atualização das mensagens de navegação transmitidas pelos satélites. Este segmento é representado por cinco estações de monitoramento distribuídas pelo mundo (Ascencion, Colorado Springs, Diego Garcia, Kwajatein e Hawaii). Estas estações rastreiam continuamente todos os satélites, transmitindo os dados para a estação de controle mestre, em Colorado Springs. Lá os dados são processados com a finalidade de determinar: os parâmetros de predição orbital (efemérides), as correções dos relógios dos satélites e os modelos ionosféricos.

O segmento usuário diz respeito às aplicações do sistema para determinação da posição, velocidade e/ou tempo, a partir da interação da comunidade usuária com os receptores e programas utilizados no sistema GPS.

O sistema GPS pode utilizar três métodos de posicionamento: Absoluto, Diferencial e Relativo.

No método Absoluto é necessário apenas um receptor, o posicionamento é obtido por meio dos sinais dos códigos, com cálculo das distâncias a partir do tempo de viagem gasto pelo sinal. Este método possui baixas precisões, pois não são empregadas técnicas de correções diferenciais. As principais fontes de erros são: a Disponibilidade Seletiva (S/A), o atraso ionosférico, o *drift clock* do satélite e as efemérides dos satélites. O método absoluto é utilizado apenas para navegação e reconhecimento. A Disponibilidade Seletiva (S/A) é uma técnica de degradação, introduzida pelo DoD, na estabilidade dos relógios dos satélites e na mensagem por eles transmitidas.

O método Diferencial (*Differential GPS*) é geralmente retratado onde se faz correções em tempo real, de posições baseadas no código C/A, podendo ser relacionado também como um método relativo empregado nos sinais de código. O posicionamento diferencial significa a posição GPS absoluta, refinada no receptor móvel a partir de dados do receptor base. A correção em tempo real é realizada por meio de *link* de rádio entre os receptores. Esta técnica é amplamente utilizada na navegação. A observação dos códigos proporciona a medida do tempo de propagação do sinal entre o satélite e o receptor (figura 4.2), para obter a distância entre eles, basta multiplicar o tempo de propagação pela velocidade da onda eletromagnética. A partir da medida de pelo menos quatro satélites é possível solucionar as quatro incógnitas envolvidas (latitude, longitude, altitude e tempo), obtendo-se as coordenadas do centro de fase da antena do receptor.

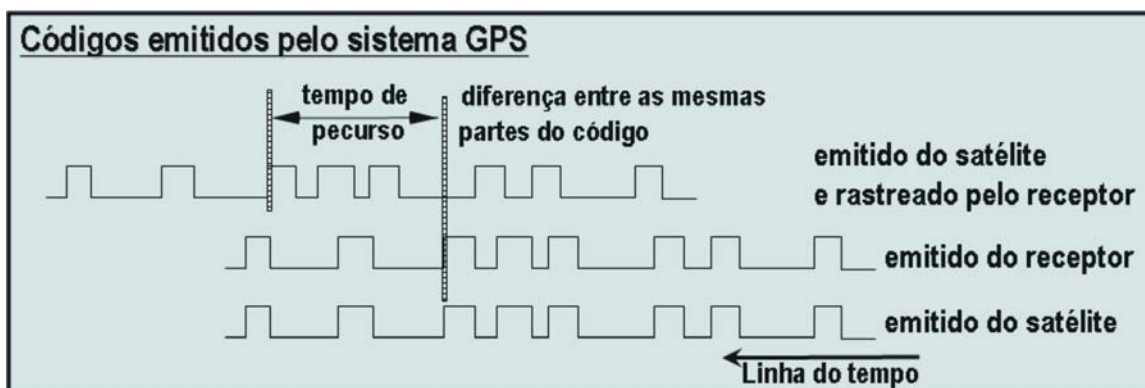


Figura 4.2 – Representação gráfica mostrando o uso do mesmo código sincronizado no satélite e no receptor. Quando o código do satélite chega ao receptor há um retardo do sinal do código. Este tempo de retardo é usado para calcular a pseudo-distância. Adaptado da Trimble (1997b).

O posicionamento relativo (Método Relativo) é a técnica mais importante nos levantamentos com GPS, proporcionando a minimização ou o cancelamento dos erros sistemáticos que ocorrem no método absoluto. Assim como no método diferencial, este tipo de levantamento também fornece indiretamente a medida da distância receptor-satélite, a partir da observação de pelo menos duas estações simultaneamente. Entretanto, neste caso se mede a diferença da fase portadora entre o sinal que chega do satélite e o gerado pelo oscilador do receptor. Nos levantamentos usando a fase portadora é necessária a solução de uma incógnita adicional para localização do ponto rastreado, denominada de ambigüidade, que é o número de ciclos inteiros identificados entre o receptor e o satélite (figura 4.3).

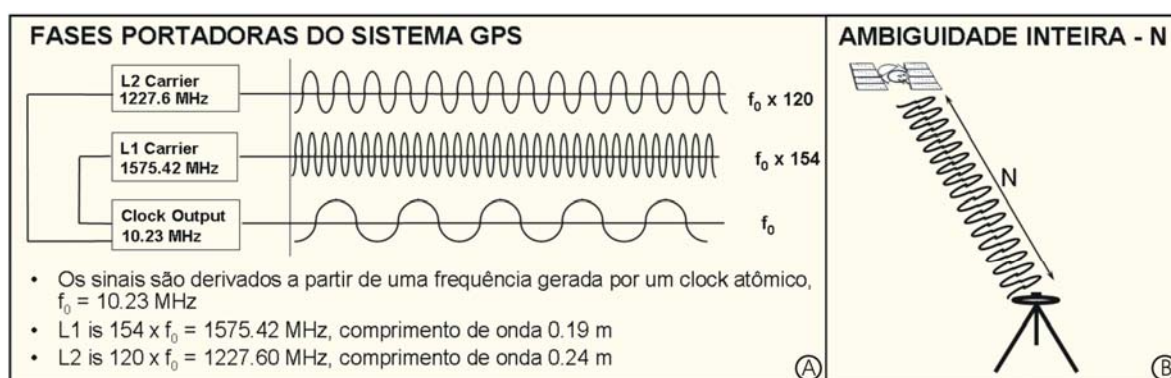


Figura 4.3 – (A) Características das fases portadoras. (B) Representação esquemática mostrando a solução da ambigüidade a partir da definição do número de ciclos inteiros da fase portadora entre o receptor e o satélite. Adaptado da Trimble (1997b).

As técnicas aplicadas aos levantamentos relativos têm sido largamente empregadas e otimizadas. As principais técnicas de posicionamento relativo são: Estático, Cinemático e Semi-cinemático (*stop-and-go*).

O Posicionamento Estático pode ser caracterizado por um levantamento, com dois ou mais receptores fixos, rastreando pelo menos quatro satélites comuns por um período de uma hora ou mais. Neste levantamento, são obtidos componentes vetoriais entre as estações com uma precisão de 1 a 2 ppm. Um outro tipo de levantamento que utiliza os mesmos princípios do Posicionamento Estático é o Estático Rápido, porém com tempo de ocupação que varia de 5 a 20 minutos.

No levantamento cinemático um receptor é mantido fixo (base) enquanto um ou mais receptores se movimentam continuamente. A taxa de gravação para cada ponto é de apenas uma época, que representa a quantidade de leitura realizada em um ponto.

O posicionamento Semi-cinemático (*stop-and-go*) é similar ao cinemático, neste caso cada ponto adquirido é ocupado no mínimo por duas épocas. Para se

trabalhar com a fase portadora, há necessidade de determinar a ambigüidade a partir da ocupação do primeiro ponto por pelo menos 10 minutos. Receptores mais modernos já apresentam solução da ambigüidade em tempo real (*Ambiguities Fixing on the Fly*).

Na tabela 4.1 estão relacionadas as aplicações do sistema com os tipos de posicionamento, receptores e suas precisões.

Um dos fatores que influenciam na qualidade das determinações das coordenadas com GPS, independente do método utilizado, é à disposição da geometria dos satélites, denominada de DOP (*Dilution Of Precision*). Quanto menor o seu valor mais precisa será a posição do ponto rastreado. Nos levantamentos, o PDOP (DOP da posição – geometria dos satélites rastreados) e o RDOP (DOP relativo – mudança na geometria dos satélites no período de rastreio) são os mais importantes.

Neste trabalho, para aquisição dos dados plani-altimétricos com o GPS Geodésico foi utilizado um par de equipamentos (Base e Rover) da TOPCON. O GPS Base usado foi o receptor Legacy-H GD L1/L2 e antena Legant. Para levantamentos com soluções de ambigüidades em tempo real, além dos acessórios

Tabela 4.1 – Técnicas de posicionamento com sistema GPS. Dados extraídos do IBGE - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS (Normas Preliminares).

| MÉTODO | APLICAÇÃO | OBSERVAÇÃO | PRECISÃO | |
|--|--------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| | | | (sem S/A) | (com S/A) |
| Absoluto | Navegação Reconhecimento | Código C/A | 30m | 120m |
| | | Código P | 20m | 120m |
| DGPS | Navegação Engenharia | Código C/A | 1 a 10m | 1 a 10m |
| | | Código P | - | - |
| Relativo (Estático) | Geodésia (base curta) | Portadora L1 | 2 ppm | 2 ppm |
| | Geodésia | Portadora L1 e L2 | 1 ppm | 1 ppm |
| Relativo (Cinemático) | Geodésia (base curta) | Portadora L1 | 2 ppm | 2 ppm |
| | | Portadora L1 e L2 | 1 ppm | 1 ppm |
| Relativo (Semi-cinemático) | Geodésia (base curta) | Portadora L1 | 2 ppm | 2 ppm |
| | | Portadora L1 e L2 | 1 ppm | 1 ppm |
| Estático-Rápido e soluções de ambigüidades em tempo real | Geodésia (base curta) | Portadoras e código C/A | 1 ppm | 1 ppm |

empregados normalmente no uso do GPS (tripé, base nivelante, bateria e cabos) foi acoplado o rádio ao receptor. O equipamento Hiper L1-L2 foi utilizado como GPS *Rover*, o qual apresenta integrado ao seu sistema: o receptor, a antena e o rádio, neste equipamento foram usados também bastão e bipé como acessórios.

Nos levantamentos com GPS foram aplicados métodos de posicionamento relativo, onde foram realizados primeiramente transportes de coordenadas a partir de técnicas de posicionamento estático. Posteriormente, foram adquiridos dados plani-altimétricos do afloramento usando técnicas de posicionamento com solução de ambigüidades em tempo real, denominada de RTK (*Real Time Kinematic*).

A altitude adotada oficialmente no Brasil é referida ao Geóide (chamada Altitude Ortométrica h , referenciada ao nível médio dos mares) e as altitudes fornecidas pelo GPS são Altitudes Elipsoidais (H), referidas ao datum WGS84 e ambas as altitudes são correlacionadas pela Ondulação Geoidal (N) por meio da fórmula: $H = h + N$. Onde a Ondulação Geoidal é o desnível da superfície do geóide, acima ou abaixo da superfície de um determinado elipsóide, conforme apresentado na figura 4.4.

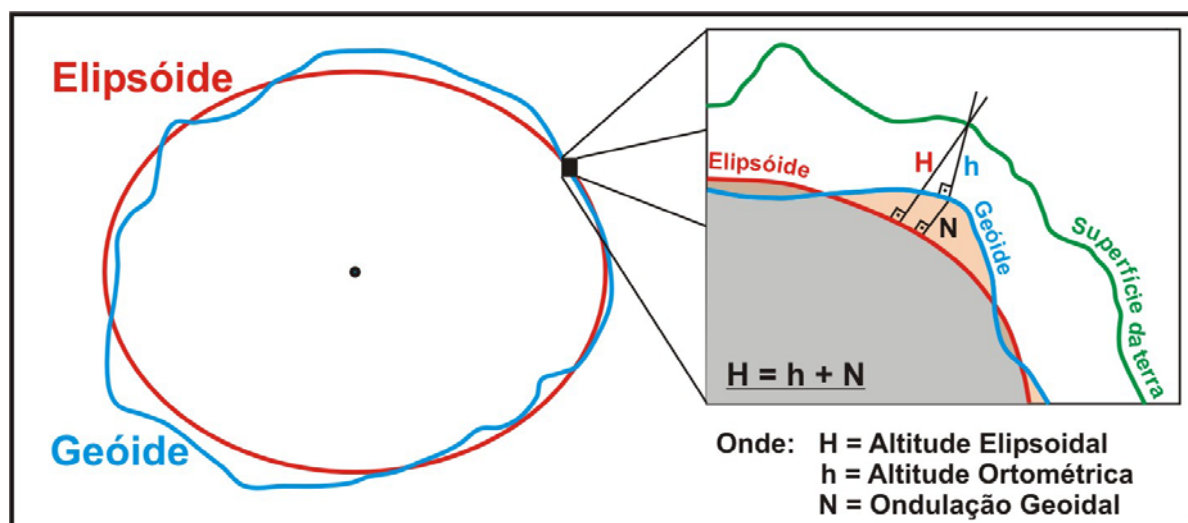


Figura 4.4 – Representação esquemática mostrando a relação entre Altura Elipsoidal, Altitude Ortométrica e Ondulação Geoidal. Modificado de Blitzkow (1998).

Segundo Blitzkow (1998) se na estação de referência do GPS a Ondulação Geoidal for conhecida de alguma forma e a estação a determinar não estiver muito distante, ou seja, a poucas dezenas de quilômetros, o uso da diferença de Ondulação Geoidal entre os dois pontos pode oferecer uma maior confiança na determinação da Altitude Ortométrica com o sistema GPS. Desta forma, para adquirir os dados referenciados ao Geóide foi realizado o transporte de coordenada sobre a Referência de Nível (RN) 442 D, localizado a cerca de 2 km do afloramento

estudado, para se obter a Ondulação Geoidal e aplicar esta aos demais pontos adquiridos com o GPS, de forma a obter as Altitudes Ortométricas de cada ponto levantado. O transporte das coordenadas, efetuada no RN 442 D, foi obtido pela ocupação do RN com o GPS Base (foto 4.1) por 3 horas e para correções diferenciais. Usando as fases portadoras foram utilizados dados da estação do Crato-CE, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As correções diferenciais foram realizadas no *software* Pinnacle, que é um programa de pós-processamento da TOPCON.

Os dados da RN 442 D e do transporte com o GPS, bem como o cálculo da Ondulação Geoidal são apresentados na tabela 4.2.

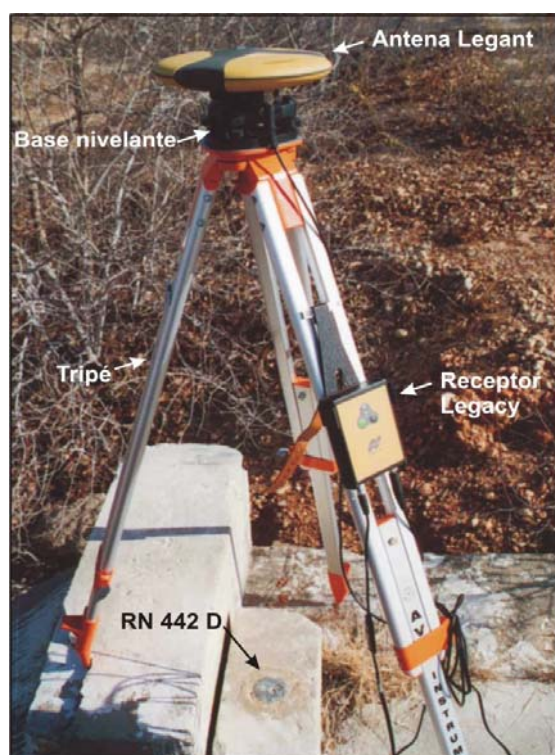


Foto 4.1 – Ocupação do RN 442 D com GPS TOPCON dupla frequência (receptor Legacy e antena Legant).

Tabela 4.2 – Resumo dos dados da RN 442 D (obtidos da página do IBGE na Internet, www.ibge.gov.br), do transporte com GPS Geodésico efetuado neste RN e da Ondulação Geoidal.

| | RN 442 D | |
|---------------------------------|--|------------------------------|
| | Nivelamento Geométrico | Transporte com GPS Geodésico |
| Descrição Geral | Chapa cravada no lado esquerdo de um pontilhão, localizado em um antigo trecho da BR-304, próximo a comunidade da Compa em Assu. | |
| Latitude | 5° 33' 54" S | 5° 33' 52.57417" S |
| Longitude | 37° 02' 14" W | 37° 02' 10.71480" W |
| Altitude Ortométrica (h) | 54.6395 m | - |
| Altitude Elipsoidal (H) | - | 77.1332 m |
| Ondulação Geoidal (N) | -22.4237 m | |

Para o levantamento plani-altimétrico do afloramento com GPS e as demais ferramentas utilizadas, houve a necessidade de realizar o transporte de coordenadas para dois marcos materializados no afloramento. Estes marcos foram chamados de pontos de amarração (PA), sendo representados por dois pregos cravados no afloramento. Nesses levantamentos usou-se a RN 442 D como ponto referencial, onde ficou posicionado o GPS Base, rastreando os satélites. Concomitantemente, o GPS Hiper rastreava os satélites nos dois pontos materializados (Foto 4.2), com cerca de 1 hora em cada ponto.

As coordenadas obtidas nos levantamentos estáticos estão apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coordenadas planas e geodésicas, bem como suas altitudes, da Estação do Crato-CE e dos pontos transportados nos levantamentos executado no método estático.

| PONTO | COORDENADAS | | | | ALTITUDE (m) | |
|-------------------|-------------|------------|-----------------|------------------|--------------|-------------|
| | UTM (m) | | GEODÉSICA | | Elipsoidal | Ortométrica |
| | Norte | Este | Latitude | Longitude | | |
| Base CRATO | 9199959,790 | 454158,780 | 7°14'15.41440"S | 39°24'54.88260"W | 462,335 | - |
| RN442D | 9384560,996 | 717529,542 | 5°33'52.57417"S | 37°02'10.71480"W | 77,133 | 54,709 |
| PA1 | 9385018,868 | 719526,180 | 5°33'37.45452"S | 37°01'05.90401"W | 56,661 | 34,237 |
| PA2 | 9385086,460 | 719548,619 | 5°33'35.25212"S | 37°01'05.18247"W | 60,678 | 38,254 |



Foto 4.2 – Levantamento estático realizado com GPS Hiper dupla frequência, no ponto de amarração PA2. Localizado no afloramento da Fazenda Currallinho.

No levantamento plani-altimétrico do afloramento, com o RTK, o GPS Base conectado ao rádio ficou posicionado no ponto de amarração PA1.

Para soluções das ambigüidades em tempo real foi utilizado o programa Survey Pro, instalado no coletor de dados Ranger 200 t. No programa foram configurados os dois receptores e especificadas: as coordenadas e altitude do GPS Base; o tipo e a altura das antenas dos GPS; a taxa de gravação dos receptores e a sintonia dos rádios para comunicação entre os dois GPS. Posteriormente, foram realizadas configurações para o levantamento dos pontos, onde se optou pela aquisição ponto a ponto definindo uma precisão de 5mm na altitude. Foram adquiridos dados nas regiões planas, denominadas informalmente como piso e alto do afloramento, num total de 793 pontos. Após o levantamento, os dados foram exportados (programa Survey Pro) como arquivo ASCII e, posteriormente, transferidos do coletor de dados para o PC. A figura 4.5 mostra a distribuição dos pontos adquiridos com o GPS Geodésico e os dois pontos de amarração do afloramento, além dos pontos coletados com Estação Total.

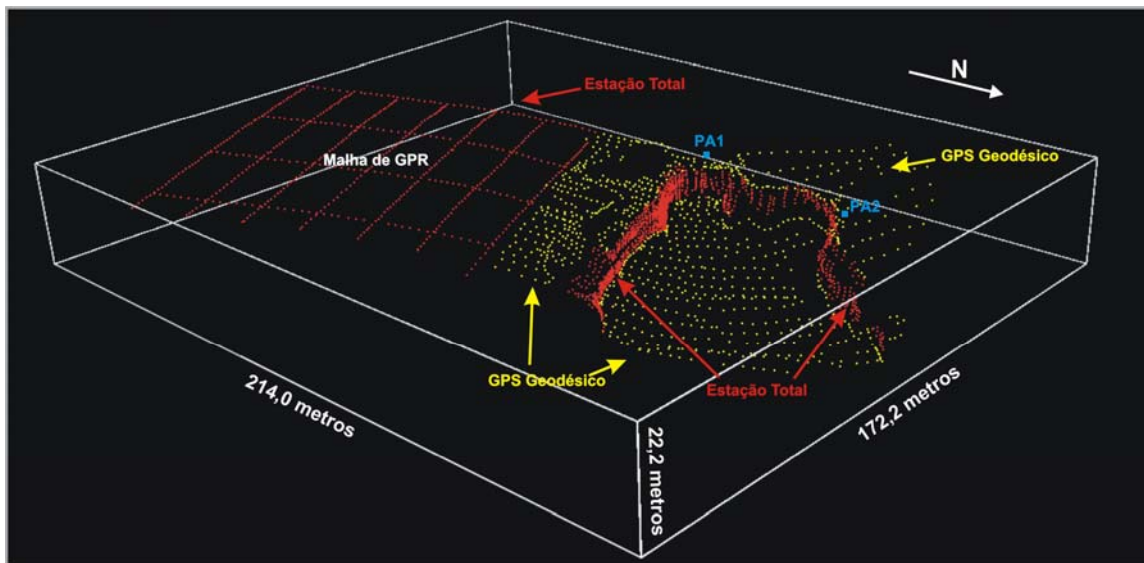


Figura 4.5 - Distribuição dos pontos adquiridos com o GPS Geodésico, Estação Total, bem como os dois pontos de amarração do afloramento.

4.2 - LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)

A tecnologia LIDAR combina um feixe de laser de baixa energia com um sistema sensorial de alta sensibilidade, para modelar tridimensionalmente superfícies sólidas com rapidez e precisão. O sensor mensura o tempo em que um pulso de laser leva para atingir a superfície e retornar ao equipamento. Como a onda movimenta-se a velocidade da luz, o tempo de percurso do pulso pode ser convertido em distância. Combinando esta distância com os ângulos vertical e

horizontal de saída do pulso de laser, valores precisos das posições (x, y e z) podem ser calculados para cada ponto rastreado. Além do posicionamento espacial para cada ponto, este também apresenta valores de reflectividade, que refletem a intensidade de retorno do laser. Este atributo é importante no modelamento, pois diferentes feições podem ser identificadas a partir de imagem geradas com base na reflectividade. Como no levantamento são obtidos milhares a milhões de pontos, o produto final deste é uma nuvem de pontos que representa a superfície do corpo imageado dentro de um domínio 3D.

A tecnologia LIDAR surgiu em 1998 apresentando uma rápida expansão nos mais diversos tipos de projeto na área da engenharia, arquitetura, digitalização de estruturas, plantas industriais, plataformas *offshore*, plantas petroquímicas, meio ambiente, preservação de patrimônio, entre outras, podendo ser aplicada tanto em terra como aerotransportada. O uso do laser como instrumento de sensoriamento remoto teve início na década de 60, onde são registradas aplicações em satélites para monitoramentos atmosféricos e estudos oceanográficos. A NASA, na década de 80, desenvolveu o projeto ATM (*Airborne Topographic Mapper*), o qual usava a tecnologia laser para levantamentos plani-altimétricos, a partir de instrumentos transportados por aeronaves. Esta tecnologia também tem sido empregada com sucesso em missões espaciais, destacando a missão MOLA (*Mars Observer Laser Altimeter*). Atualmente, um satélite encontra-se em órbita ao redor do planeta Marte com o objetivo de obter mapas topográficos detalhados da sua superfície. A tecnologia LIDAR representa hoje a principal ferramenta para geração de modelos digitais de terreno, com alta resolução e precisão, disponível no mercado.

Com o *Laser Scanner* é possível a elaboração de trabalhos com custo relativamente baixos e tempo reduzido de levantamento e processamento, quando comparado às formas tradicionais de levantamentos de dados. Outra vantagem desta técnica é a possibilidade de execução de levantamentos independentemente das condições de luminosidade existente, já que o sistema não utiliza a luz visível.

O pioneirismo no uso do *Laser Scanner* em estudo de afloramentos análogos é creditado aos pesquisadores do Departamento de Geologia Econômica da Universidade do Texas. Este grupo adquiriu o equipamento em 2002 e vem usando esta ferramenta para análise quantitativa de corpos geológicos em afloramentos, desenvolvendo seus principais trabalhos no Texas e no norte da Espanha. No Brasil, o emprego do *Laser Scanner* em estudos de análogos encontra-se em estágio inicial, com grupos de pesquisas adquirindo seus equipamentos ou começando a executar levantamentos em campo.

Acredita-se que este seja o primeiro trabalho no país, a utilizar essa ferramenta para caracterização e modelagem 3D de análogos. O seu emprego no afloramento da Unidade Açú-3, apresentada nesta dissertação, foi possível graças à parceria entre o grupo de pesquisa GEA e a empresa Santiago & Cintra.

O *Laser Scanner* Cyrax 2500 da Leica Geosystems (foto 4.3), utilizado no levantamento do afloramento, é um sistema que efetua a captura de centenas de milhares de pontos com precisão maior que 6mm, a uma distância de 50m do alvo, a partir de um ponto fixo. O sistema do Cyrax 2500 é controlado por meio da interface de um laptop padrão IBM/PC, onde são registrados e apresentados graficamente, em tempo real, a nuvem de pontos.



Foto 4.3 – Laser Scanner Cyrax 2500 e laptop padrão IBM/PC.

O Cyrax 2500 usa uma câmara digital integrada ao seu sistema para obter fotos da cena, permitindo observar exatamente o campo de visão do equipamento, podendo ainda selecionar uma área específica na imagem a ser varrida, definindo a densidade ou a resolução horizontal e vertical (foto 4.4).

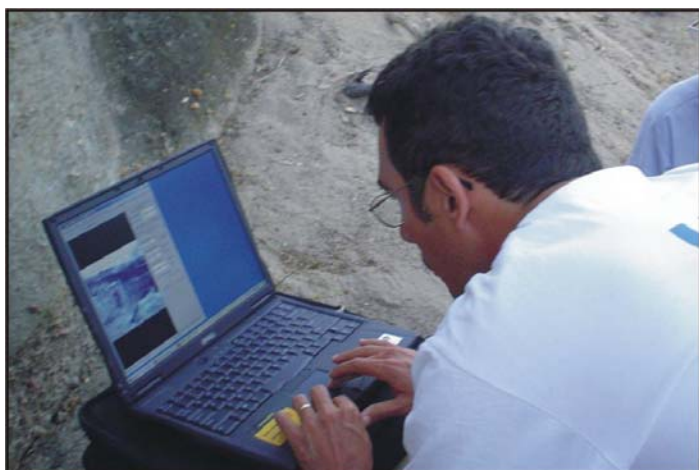


Foto 4.4 – Seleção de área para tomada da cena, com base em foto digital retirada pela câmara instalada no sistema do Cyrax 2500.

O equipamento Cyrax 2500 trabalha, durante a aquisição, com um sistema de coordenada arbitrária, com o ponto de origem ($O = (0,0,0)$) correspondente ao próprio centro do *scanner*, onde os ângulos vertical e horizontal são nulos. Na maioria dos trabalhos realizados com o *Laser Scanner*, o instrumento é montado em diferentes locais próximos da área a ser imageada. Desta forma é necessária a utilização de pelo menos 3 pontos de referência (alvos) (foto 4.5). Eles são dispostos não linearmente e obrigatoriamente são comuns a duas cenas, para que na etapa de processamento dos dados seja possível unir, em um único sistema de coordenadas, duas varreduras de maneira precisa. Características comuns entre duas cenas, também podem ser usadas para unir a nuvem de pontos quando não é necessária uma alta precisão.



Foto 4.5 – Vista de três alvos dispostos não linearmente comuns a duas cenas.

O primeiro passo para aquisição de cenas com *Laser Scanner* no afloramento é o planejamento para execução do levantamento. Nesta etapa, foram definidas 4 estações para posicionar o equipamento, onde foram imageadas 11 cenas. Devido as irregularidades no afloramento a “nuvem”, com 2.143.300 pontos, apresentou uma resolução variando de 2 a 7mm.

Um esboço do trabalho, executado com Cyrax 2500, mostrando a distribuição e números de pontos para cada cena adquirida é apresentado na figura 4.6 e na tabela 4.4. percurso.

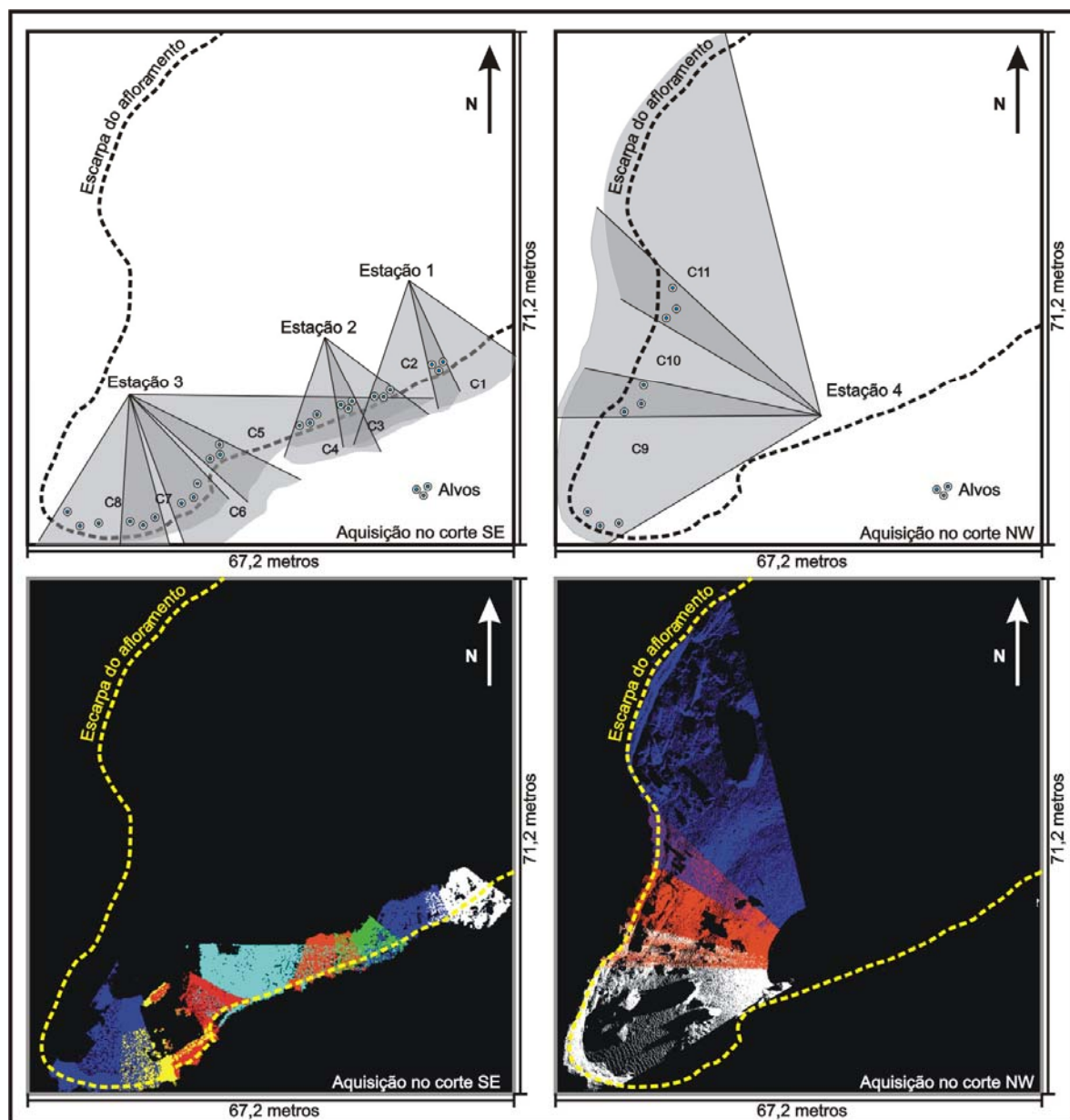
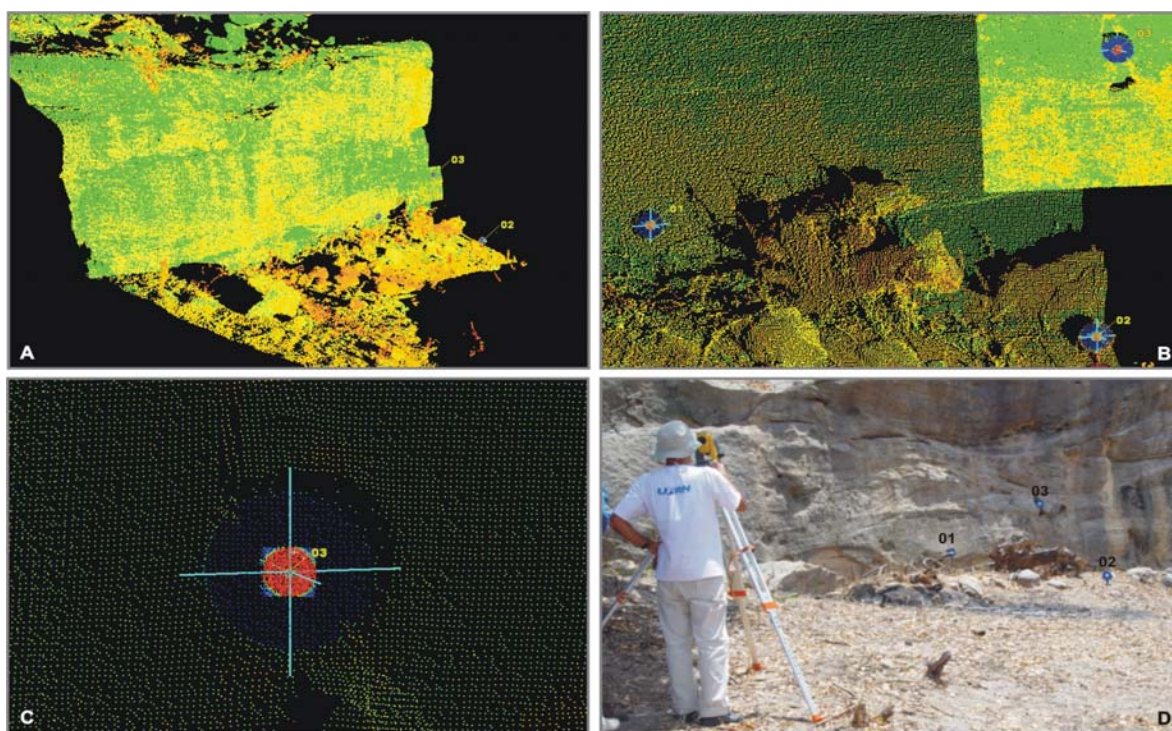


Figura 4.6 – Distribuição das estações utilizadas e das cenas “varridas” no afloramento com o Laser Scanner.

Para fundir as 11 cenas em uma única “nuvem de pontos” foram distribuídos alvos, de forma que três deles se apresentassem comuns a duas cenas vizinhas. Para fazer a amarração de coordenadas para o levantamento com o *Laser Scanner* no mesmo sistema de coordenadas usado nas aquisições com GPS e a Estação Total foram realizados os georreferenciamentos dos 3 alvos da primeira cena. As coordenadas dos alvos foram obtidas por meio da Estação Total, com base nos pontos de amarração PA1 e PA2 (figura 4.7).

Tabela 4.4 – Localização e número de pontos para cada cena “varrida” no afloramento.

| ESTAÇÃO | CENA | N ^o DE PONTOS |
|---------|------|--------------------------|
| 1 | C1 | 396.704 |
| | C2 | 415.486 |
| 2 | C3 | 151.454 |
| | C4 | 153.322 |
| 3 | C5 | 138.050 |
| | C6 | 144.094 |
| | C7 | 106.584 |
| | C8 | 135.046 |
| 4 | C9 | 149.826 |
| | C10 | 118.632 |
| | C11 | 234.102 |

**Figura 4.7** – (A) “Nuvem de pontos” adquirida na cena 1, (B e C) Detalhes dos alvos na cena 1 e (D) Leitura das coordenadas dos alvos com a Estação Total.

Depois de efetuados os trabalhos em campo, as cenas obtidas foram processadas no *software* Cyclone, por profissionais da Santiago & Cintra. No procedimento utilizado as cenas foram registradas, georreferenciadas e extraídos pontos não contidos na escarpa do afloramento. Posteriormente, foram exportados os dados em formato ASCII, para modelamento no programa GoCad. A figura 4.8 apresenta várias visualizações do produto final obtido no levantamento com *Laser Scanner* Cyrax 2500.

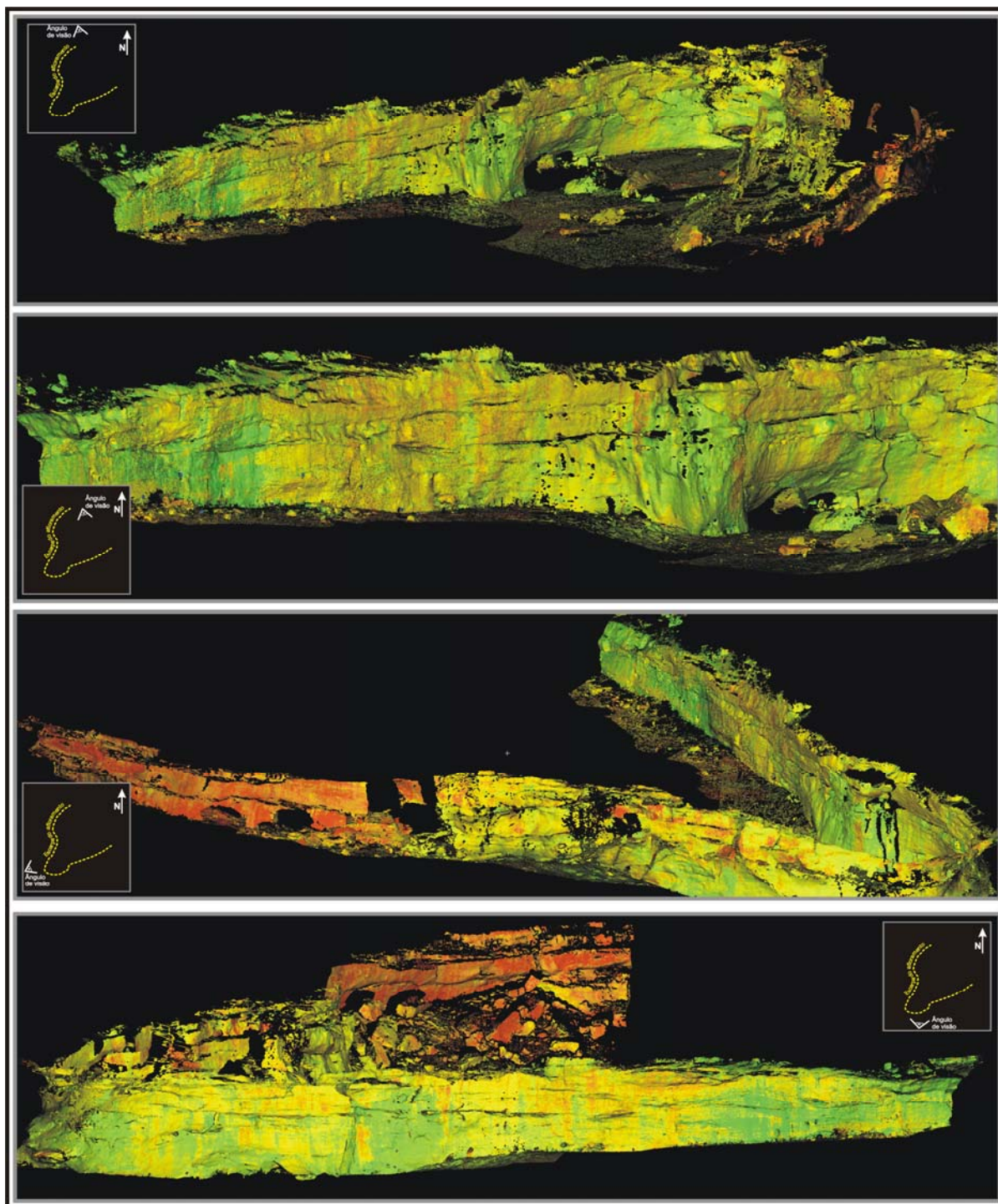


Figura 4.8 – Visualizações do produto final obtido no processamento usando o programa Cyclone.

4.3 - GROUND PENETRATION RADAR (GPR)

O GPR é um método eletromagnético que utiliza ondas de rádio para o imageamento de estruturas e feições da subsuperfície rasa. O método baseia-se na emissão, por meio de uma antena transmissora, de um pulso curto de energia eletromagnética de alta frequência (ondas na faixa de 10 a 1000 MHz) que é

transmitida ao solo. Na propagação, os pulsos emitidos sofrem reflexões, refrações e difrações em descontinuidades presentes no subsolo, que são captados ao retornar a superfície, por uma antena receptora, os quais são amplificados e registrados (Robinson & Michaud, 1999) (figura 4.9).

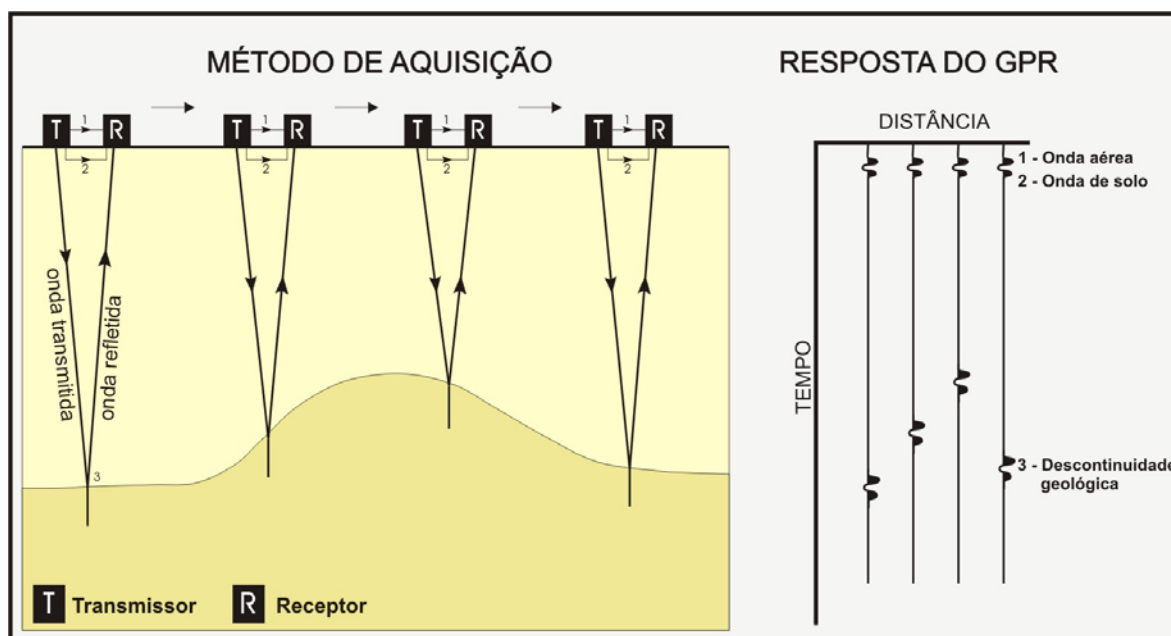


Figura 4.9 – Representação esquemática do método GPR mostrando a aquisição e resposta de 4 traços em um perfil de reflexão. A figura mostra ainda o comportamento da onda eletromagnética no ar, na interface ar-solo e nas descontinuidades do subsolo. Modificado de Robinson & Michaud (1999).

Davis & Annan (1989) afirmam que a propagação e reflexão das ondas dependem das propriedades elétricas do solo. Segundo estes autores o contraste nas propriedades elétricas, que ocorre nas descontinuidades, causa reflexão de parte da onda transmitida. Em condições de baixa perda da onda eletromagnética, a velocidade de propagação está relacionada como a parte real da constante dielétrica do meio de propagação, pela seguinte expressão:

$$V = \frac{C}{\sqrt{K}}$$

Onde: V = velocidade de propagação
K = constante dielétrica
C = velocidade da luz

Segundo Robinson e Michaud (1999) a profundidade de penetração do sinal do radar é controlada pela razão de atenuação do material, o qual é primeiramente influenciado pela condutividade elétrica.

A tabela 4.5 apresenta alguns valores da constante dielétrica (K), velocidade (V), condutividade (σ) e atenuação (α) para vários tipos de materiais.

Tabela 4.5 – Valores de constante dielétrica, velocidade, condutividade e atenuação, para materiais geológicos comuns, modificado de Davis & Annan (1989).

| Material | K | V (m/ns) | σ (mS/m) | α (dB/m) |
|----------------|---------|----------|-----------------|-----------------|
| Ar | 1 | 0,3 | 0 | 0 |
| Areia seca | 3 - 5 | 0,15 | 0.01 | 0,01 |
| Areia saturada | 20 - 30 | 0,06 | 0.1 - 1 | 0,03 - 0,3 |
| Folhelho | 5 - 15 | 0,09 | 1 - 100 | 1 - 100 |
| Siltito | 5 - 30 | 0,07 | 1 - 100 | 1 - 100 |

O sistema GPR trabalha com diferentes tipos de antenas, cada qual correspondendo a certa frequência central. A escolha da antena é função do objetivo do levantamento. No GPR quanto maior a frequência da antena, menor a profundidade de penetração, porém melhor a resolução. As antenas de menor frequência, não possuem boa resolução, entretanto a profundidade de penetração aumenta, podendo assim, investigar corpos mais profundos (Schenk *et al.*, 1993). A tabela 4.6 apresenta valores de resolução e profundidade de penetração em função da frequência central da antena.

Tabela 4.6 – Relação entre antenas do sistema GPR com a profundidade de penetração e resolução vertical. Modificado de Porsani (2002).

| Frequência Central (MHz) | Profundidade Máxima de penetração (m) | Resolução Teórica (m) |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 200 | 4 | 0,125 - 0,25 |
| 100 | 25 | 0,25 - 0,5 |
| 50 | 30 | 0,5 - 1 |
| 25 | 40 | 1 - 2 |

No GPR as duas principais modalidades de aquisição de dados são: O perfil de reflexão e sondagem de velocidade (CMP, *common mid point*), Davis and Annan (1989) e Annan (1992).

Na aquisição de perfis de reflexão as antenas transmissora e receptora são mantidas a uma distância fixa. Elas são transportadas ao longo do perfil com afastamento constante (*Common Offset*). Esta técnica pode ser realizada passo-a-passo ou no modo contínuo. Neste ultimo, os disparos (de cada traço) são pré-determinados segundo um período de tempo designado ou uma distância fixa, a partir de odômetro ou *Hip-chain*.

A CMP pode ser caracterizada como um experimento de campo para medir a velocidade das ondas eletromagnéticas em subsuperfície (Davis & Annan, 1989). Neste experimento, as antenas transmissora e receptora são afastadas em

sentidos opostos, em intervalos regulares de modo que seu ponto médio permaneça fixo. Nos perfis CMP, os refletores são representados por hipérboles e as ondas de solo e ar correspondem a linhas retas (figura 4.10). Estas hipérboles permitem fazer uma estimativa da velocidade de propagação da onda eletromagnética em subsuperfície. A representação da hipérbole de “*move-out*” no espaço X^2 vs T^2 mostrará uma reta, onde a inclinação desta será inversamente proporcional à velocidade de propagação da onda (Porsani, 2002).

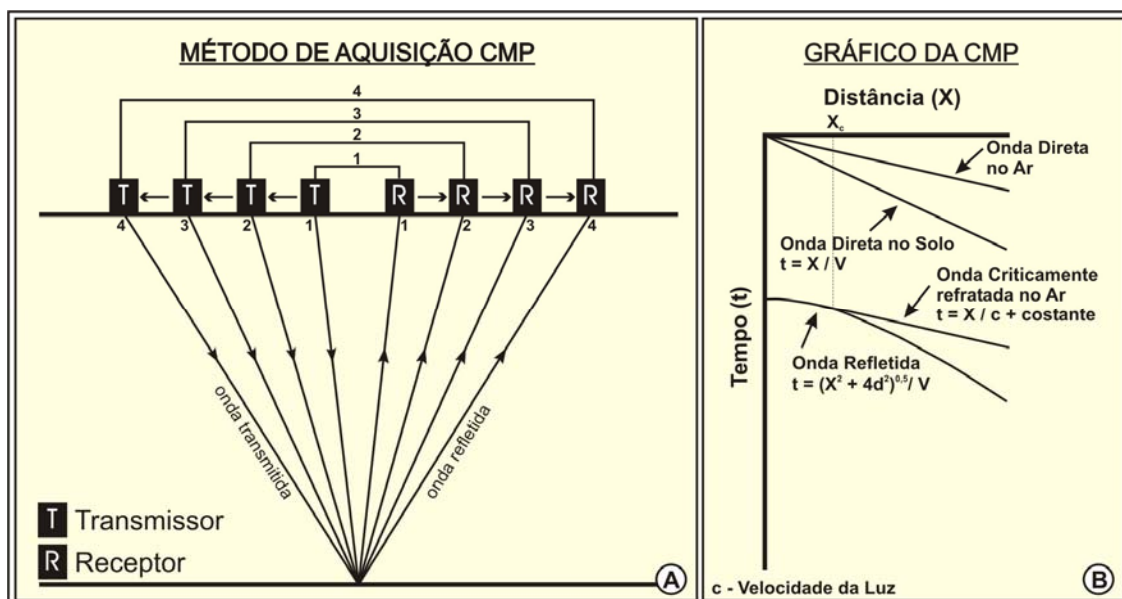


Figura 4.10 – (A) Representação esquemática da aquisição CMP (Robinson & Michaud 1999); (B) Eventos idealizados do tempo de chegada em função da separação das antenas numa sondagem CMP (Porsani, 2002).

Todos os sistemas GPR consistem basicamente de quatro elementos básicos: antenas (transmissora e receptora), unidades eletrônicas (transmissora e receptora), unidade de controle e unidade *display* (Davis & Annan, 1989) (figura 4.11). Os dados deste trabalho foram adquiridos com o equipamento RAMAC/GPR da MALA GeoScience (foto 4.6).

Mais recentemente o georadar, como também é conhecido o GPR, tem sido bastante utilizado no estudo de análogos aos reservatórios petrolíferos, para caracterização da geometria de corpos sedimentares. Dentre os artigos pioneiros, que envolvem a caracterização de depósitos fluviais recentes, podem ser citados (Gawthorper *et al.* 1993; Bridge *et al.* 1995; Bristow, 1995; McMecham *et al.* 1997; Bridge *et al.* 1998) como também os realizados em afloramentos de origem fluvial (McMecham *et al.* 1997, Corbeau *et al.* 2001). Porsani & Rodrigues (1995) utilizaram este método para caracterizar depósitos fluviais da Formação Açu.

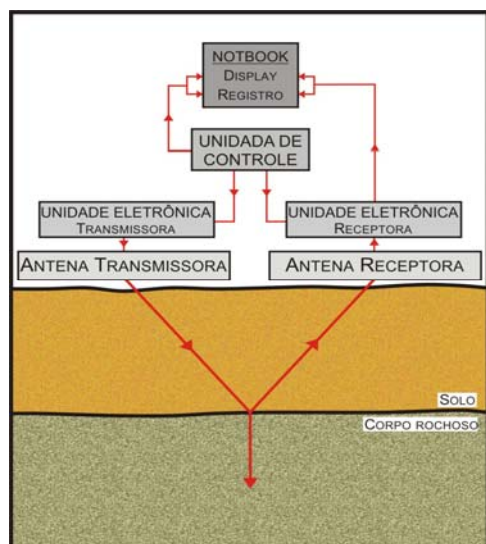


Figura 4.11 – Representação esquemática de um típico sistema GPR. Modificado de Davis & Annan (1989).

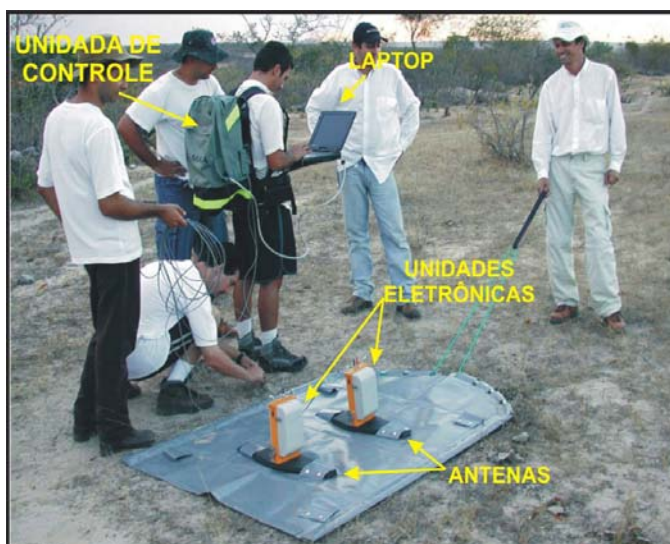


Foto 4.6 – Equipamento RAMAC/GPR da MALÃ GeoScience, com antena de 200 MHz.

No presente trabalho foram realizados levantamentos com GPR nos afloramentos da Unidade Açú-3 e no aluvião do Rio Assu, com objetivo de se obter a geometria dos corpos sedimentares dentro de um domínio tridimensional.

Os perfis de reflexão levantados no afloramento BP/A-3/14 foram obtidos usando antenas de 100 e 50 MHz, no modo passo-a-passo, com espaçamento de 0,5m entre os pontos de medida, com empilhamento de 256 vezes. A configuração referente à frequência de amostragem, janela de tempo e número de amostragem, para cada antena utilizada, é apresentada na tabela 4.7.

Os perfis levantados no afloramento compõem uma malha com um total de onze linhas. A malha é composta por sete linhas paralelas ao corte principal do afloramento, as linhas possuem espaçamento de 15m, sendo que a primeira linha encontra-se a cerca de 20m do corte. As outras quatro linhas estão posicionadas ortogonalmente ao corte principal do afloramento, com espaçamento de 30m. No afloramento foram levantadas um total de 2.120m de linhas GPR (figura 4.12).

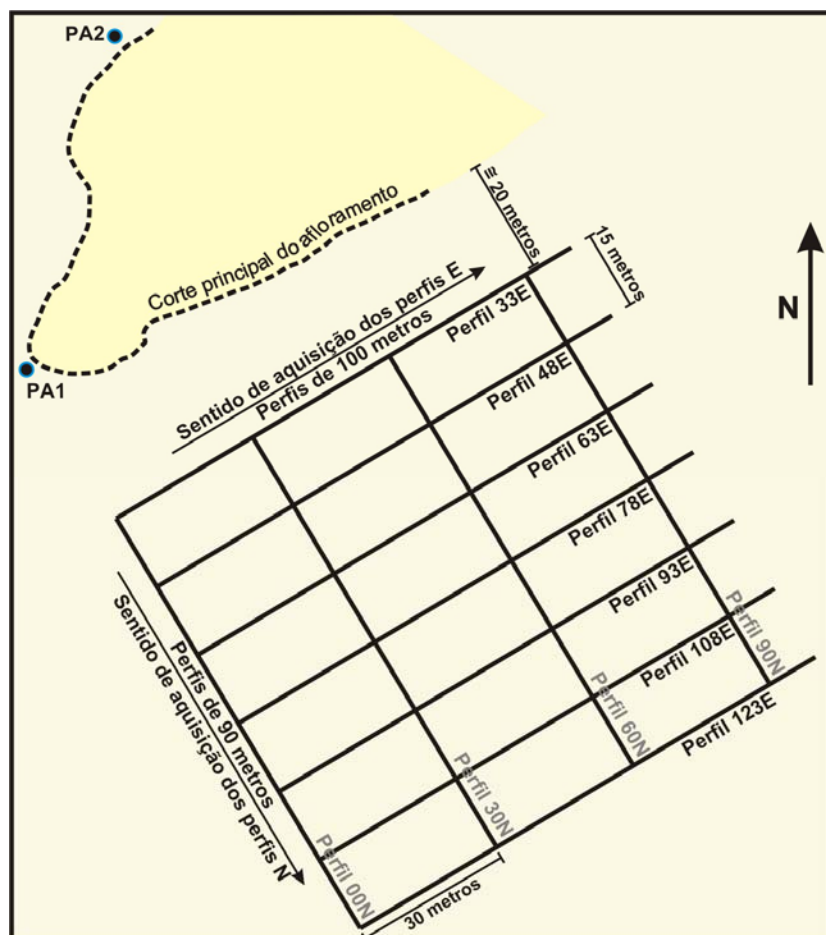


Figura 4.12 – Malha de GPR levantada no afloramento BP/A-3/14. Os pontos PA1 e PA2 são marcos de referência do afloramento.

A abertura da malha de GPR foi acompanhada de levantamento topográfico, de forma a permitir a correção altimétrica dos dados de GPR. No levantamento utilizou-se uma Estação Total da marca Trimble, modelo 3305 DR. Com este equipamento foram também adquiridos pontos (X, Y e Z) ao longo da escapa do afloramento, nos locais não imageados com *Laser Scanner* (figura 4.7).

Tabela 4.7 - Configuração da frequência de amostragem, janela de tempo e número de amostragem, para cada antena utilizada no afloramento BP/A-3/14.

| ANTENA | Frequência de Amostragem | Janela de Tempo | Número de Amostragem |
|---------|--------------------------|-----------------|----------------------|
| 100 MHz | 1032 | 495 | 512 |
| 50 MHz | 502 | 1019 | 512 |

No processamento dos dados foram utilizados os programas GRADIX (versão 1.11, *Interpex Limited*, USA) e RADAN (versão 4.0.2.0, *Geophysical Survey Systems, Inc.*, USA), softwares específicos para o processamento de dados GPR.

Em todos os perfis levantados foram aplicadas rotinas similares de processamento. Inicialmente os arquivos *.rd3, formato do GPR RAMAC, foram “carregados” no programa GRADIX, para aplicação do “**Drift Remove**” e

“**Correção do Tempo-zero**”, após estas rotinas os arquivos foram exportados no formato *.dzt. A continuação do processamento ocorreu no RADAN, onde foram abertos os arquivos e aplicados respectivamente o “**Filtro Passa Banda**”, os “**Ganhos Linear e Constante**” e o “**Background Removal**”. Por fim, os arquivos foram carregados novamente no GRADIX para conversão do tempo em profundidade e para correção topográfica.

Com a ausência de hipérboles nas CMP's (sondagens de velocidades) levantadas, foi admitida uma velocidade 0,1 m/ns, obtida em afloramentos da Formação Açú (Porsani & Rodrigues, 1995).

Nos perfis de reflexão adquiridos no afloramento não foram evidenciados refletores que subsidiassem interpretações geológicas de subsuperfície, aparecendo apenas reverberações, hipérboles e refletores inclinados relacionados com “pernas” de hipérboles (figura 4.13 e 4.14). Estes refletores hiperbólicos foram interpretados como ruídos (tronco de árvores, cactos e a escarpa do afloramento), pois na análise das hipérboles, estas mostraram valores de velocidade próximos a da luz. A ausência de refletores geológicos é creditada à ausência ou pouco contraste das propriedades elétricas na interface dos corpos de arenitos presentes no afloramento. Uma análise na resposta espectral dos dados de GPR do afloramento mostrou que os dados são de boa qualidade, apresentando gaussianas bem definidas. Problemas similares a este foram descritos em afloramentos da Unidade Açú-4 por Reyes-Pérez (2003).

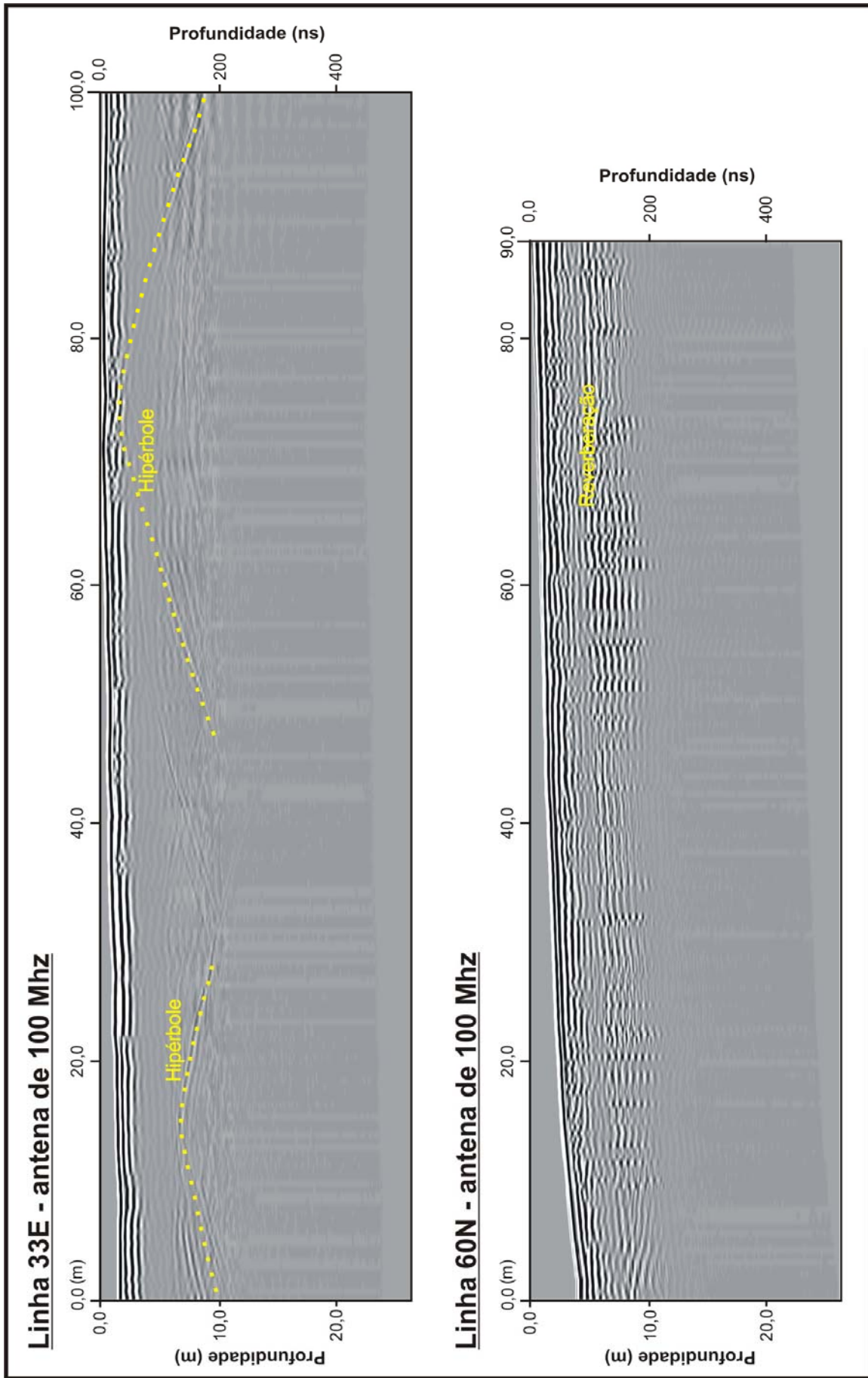


Figura 4.13 – Perfis de reflexão com antena 100 MHz levantados nas linhas 33E e 60N, mostrando ruídos e ausência de refletores geológicos.

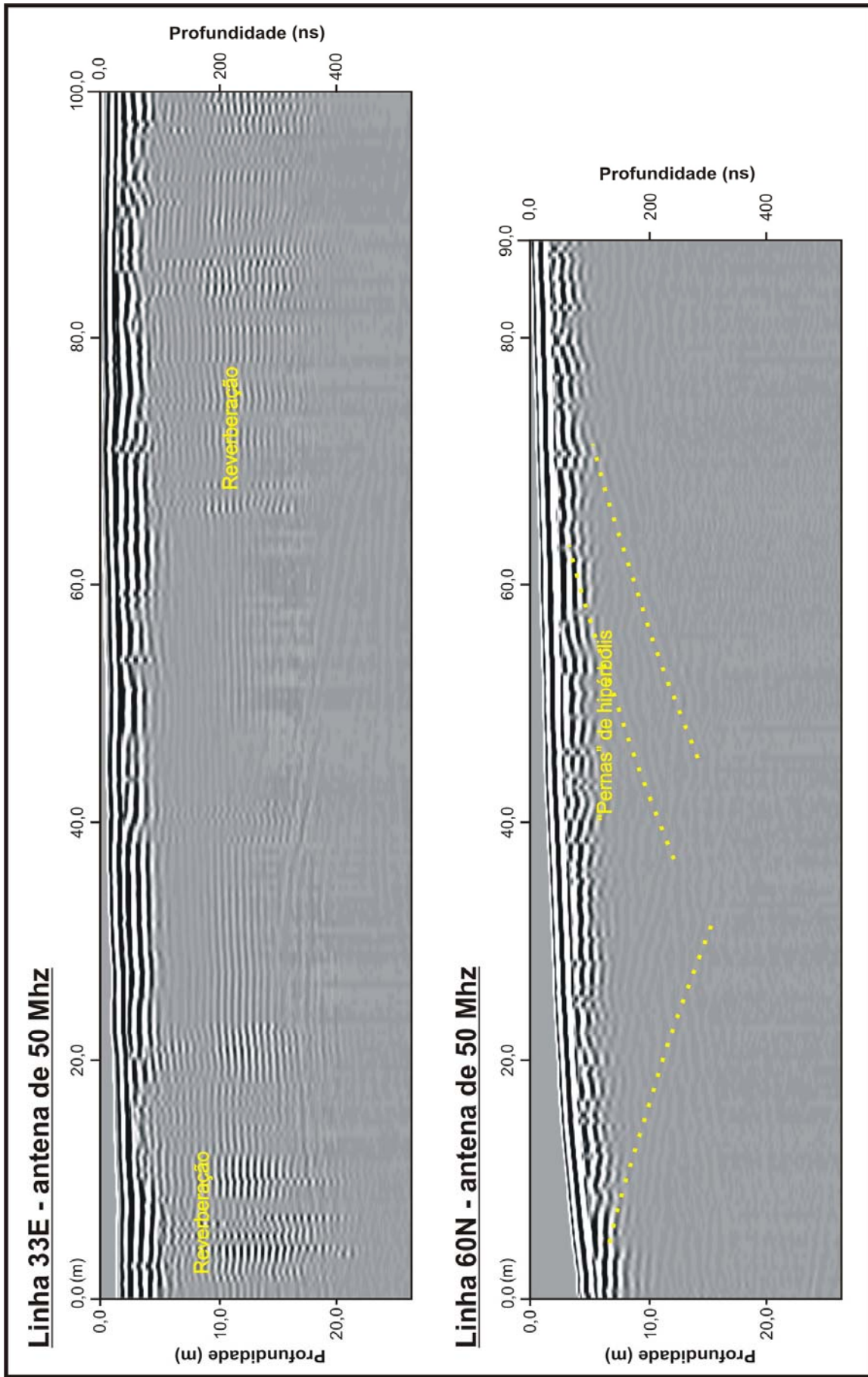


Figura 4.14 – Perfis de reflexão com antena 50 MHz levantados nas perfis 33E e 60N, mostrando ruídos e ausência de refletores geológicos.

Os perfis de reflexão levantados no aluvião do Rio Assu foram obtidos usando antenas de 200 MHz no modo contínuo, com espaçamento de 0,2m entre os pontos de medida, com empilhamento de 64 vezes. Foi utilizada uma janela de tempo 267 ns, uma frequência de amostragem de 2038 e um número de amostragem de 1024.

No rio, foi montada uma malha com 10 linhas de 200m. A malha apresenta nove perfis paralelos entre si, com espaçamento de 25m e um transversal cortando as demais no centro (figura 4.15).

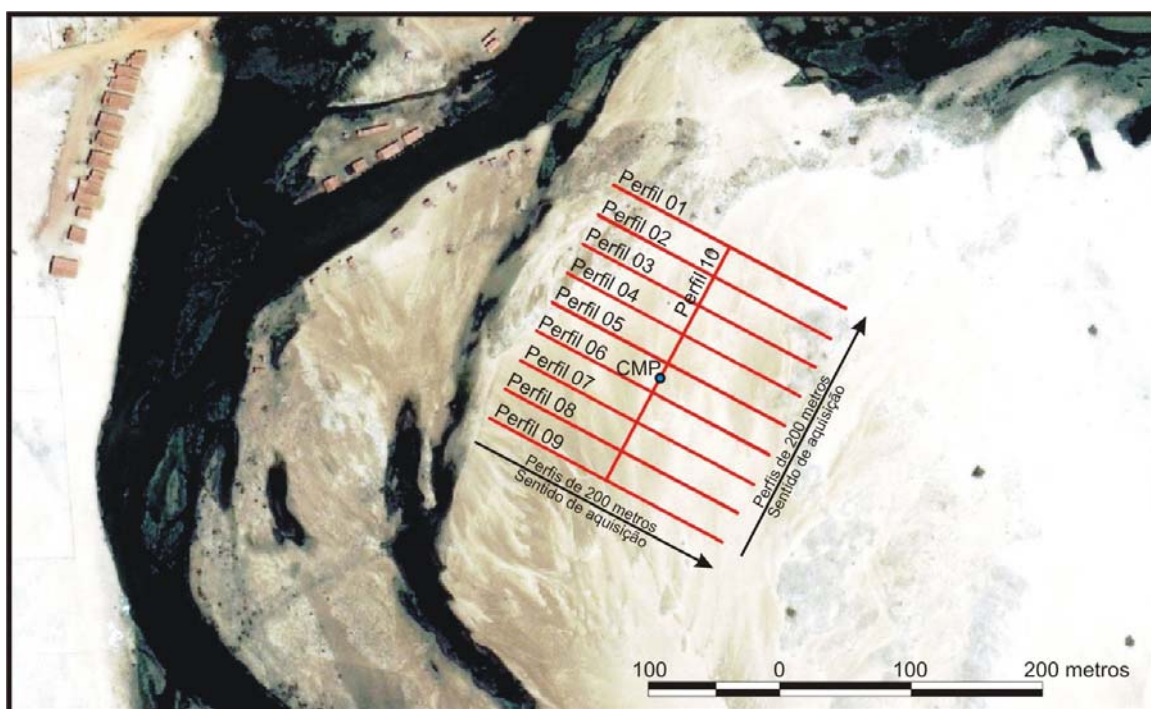


Figura 4.15 – Imagens Ikonos com a malha de GPR adquirida no Rio Assu.

Nos perfis levantados no rio foram aplicadas as mesmas rotinas de processamento utilizadas nos dados do afloramento. Porém, para conversão do tempo em profundidade usou-se a velocidade adquirida em uma CMP.

A CMP foi levantada no perfil 10, estando o ponto central a uma distância de 87m do início do perfil. A escolha foi determinada pela presença de bons refletores horizontalizados. A seção CMP foi submetida a uma análise de velocidade, na ferramenta painel do programa GRADIX, o qual determina a velocidade média diretamente do reconhecimento da CMP. A figura 4.16 mostra na seção CMP uma hipérbole assinalada em 144,4 ns apresentando uma velocidade de 89 m/ μ s, sendo esta utilizada para converter os dados de tempo para distância.

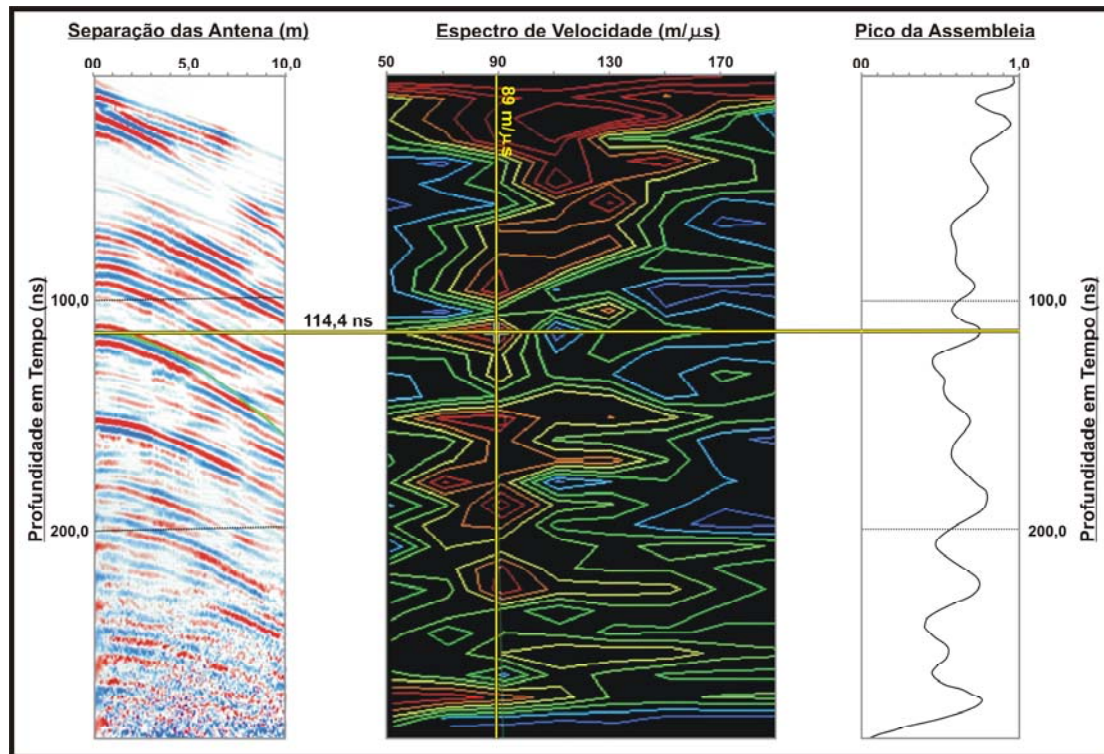


Figura 4.16 – Análise de velocidade realizada na seção CMP, para determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio imageado.

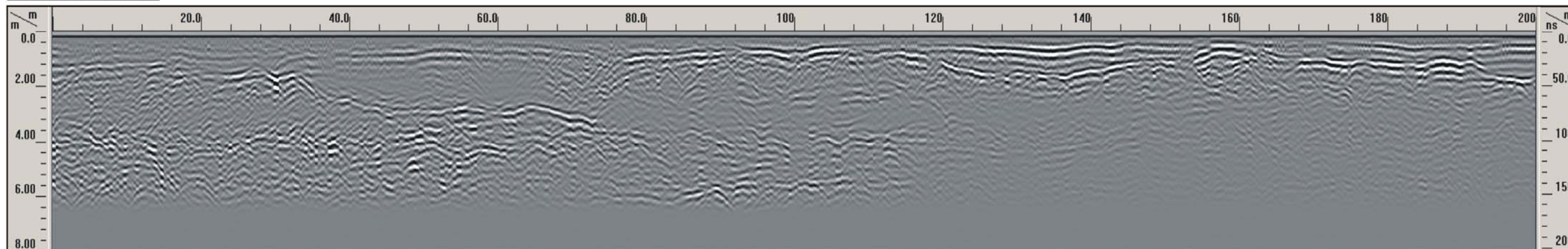
Os dez perfis processados foram exportados como imagem, os quais passaram por tratamentos no programa CorelDraw® 10 para serem interpretados.

Na interpretação foram delineados os principais refletores, com cuidado de correlacioná-los perfil a perfil. Estes refletores foram interpretados como superfícies limitantes de 3ª e 4ª ordem. Devido à falta de continuidade e de correlação entre alguns refletores, estes não foram usados para delimitação de corpos.

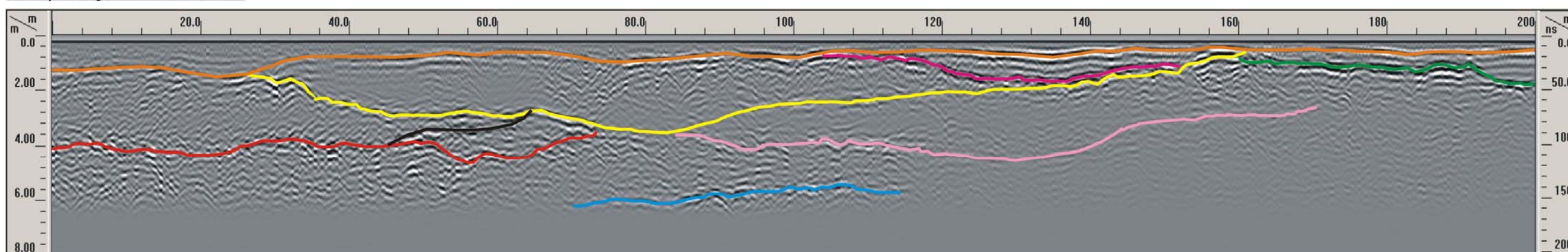
Com base na correlação dos perfis foi possível individualizar sete corpos sedimentares principais. Os topos dos perfis são caracterizados por um refletor horizontalizado, o qual foi interpretado como depósito em lençol (*sand flat*), os demais refletores são levemente inclinados ou côncavos para cima. A correlação entre estes refletores, nos dez perfis, permitiu a caracterização de várias hierarquias de canais amalgamados. Nas figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 são apresentados os perfis de reflexão, com suas interpretações geológicas.

PERFIL 01

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

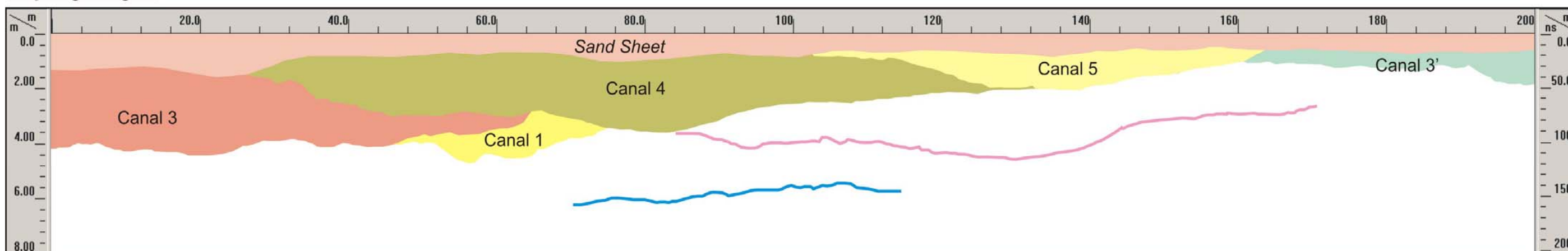
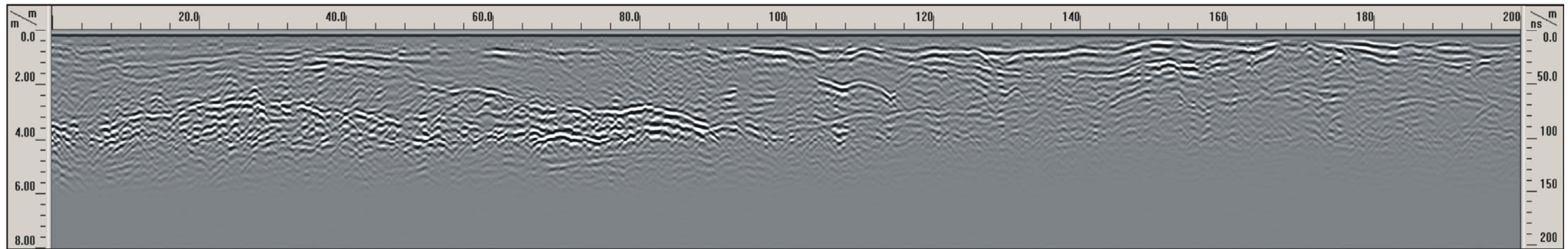


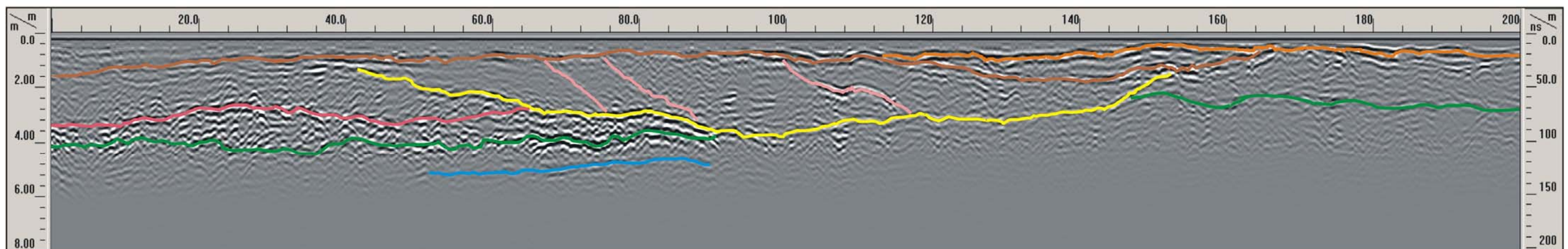
Figura 4.17 - Apresentação do perfil de reflexão 01 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 02

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

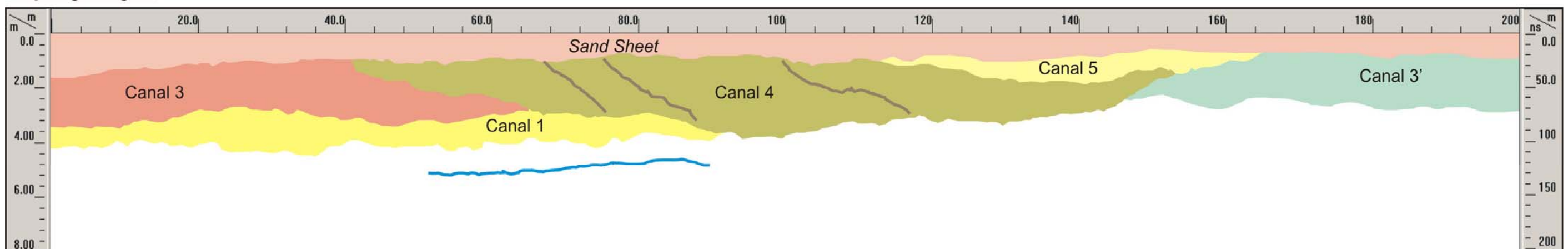
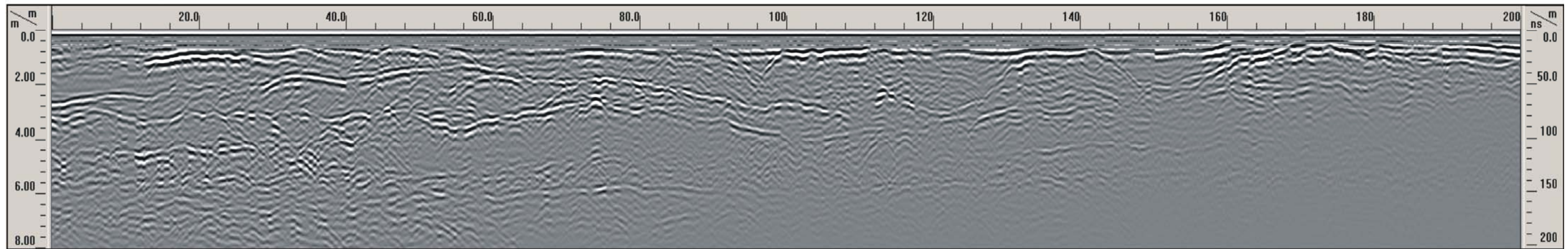


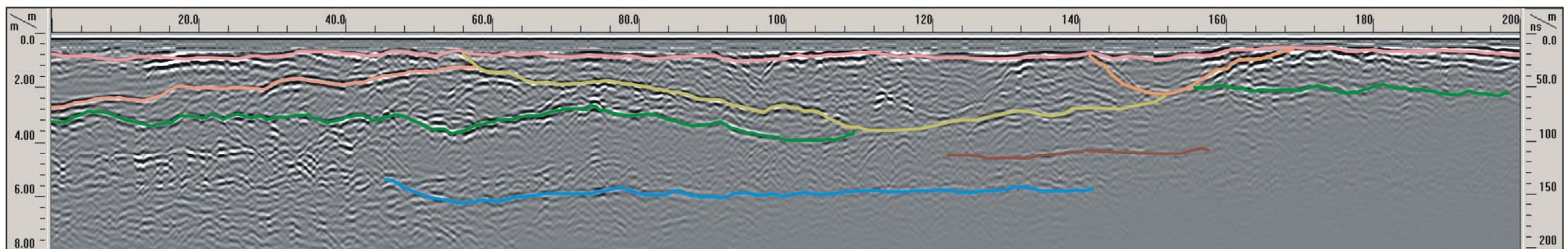
Figura 4.18 - Apresentação do perfil de reflexão 02 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 03

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

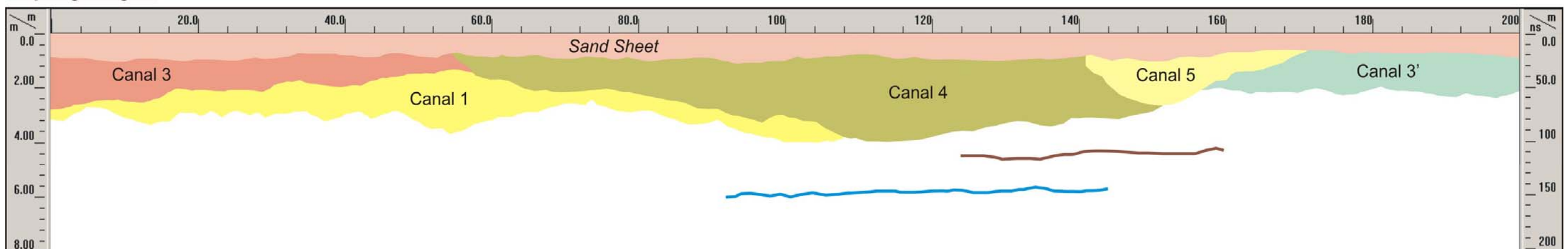
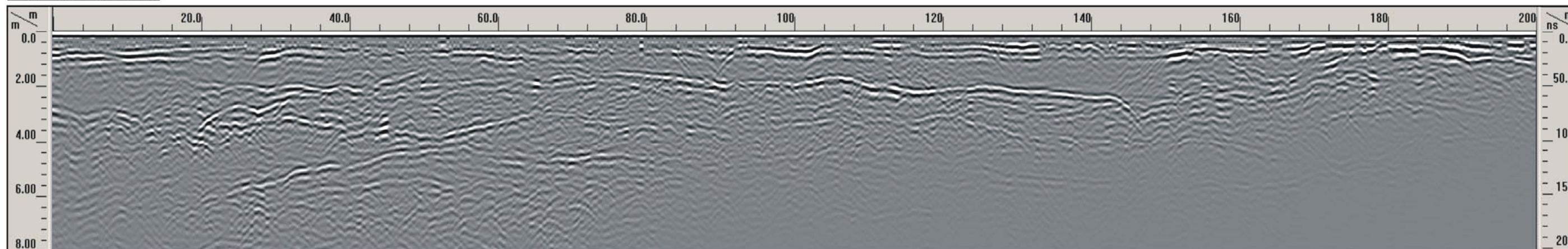


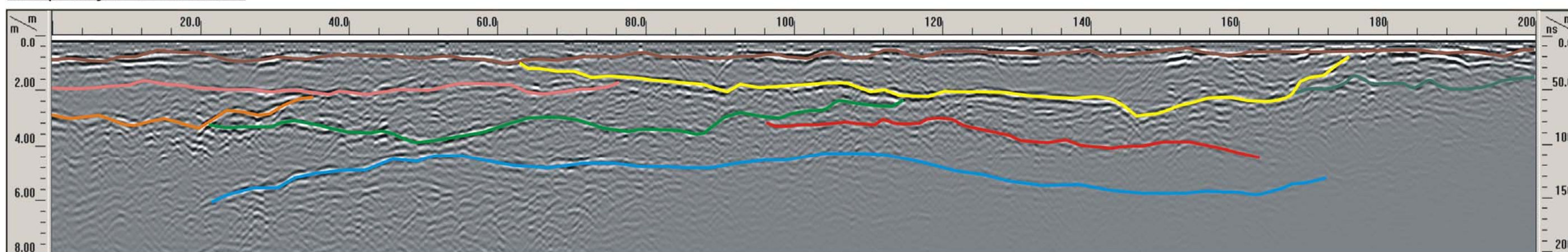
Figura 4.19 - Apresentação do perfil de reflexão 3 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 04

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

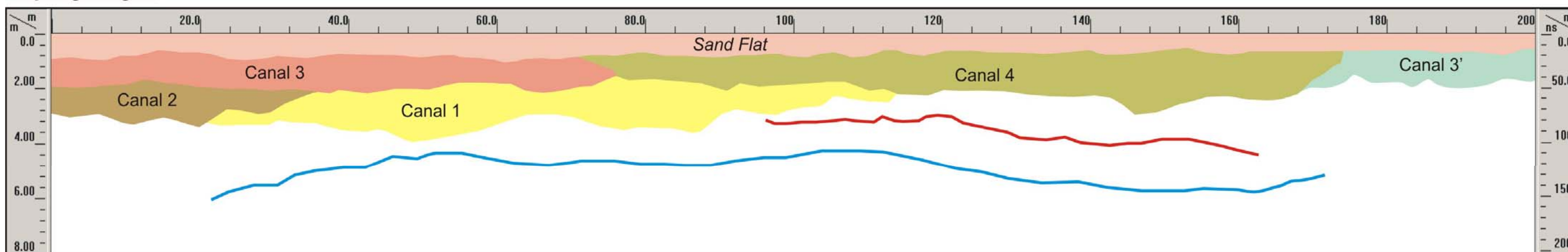
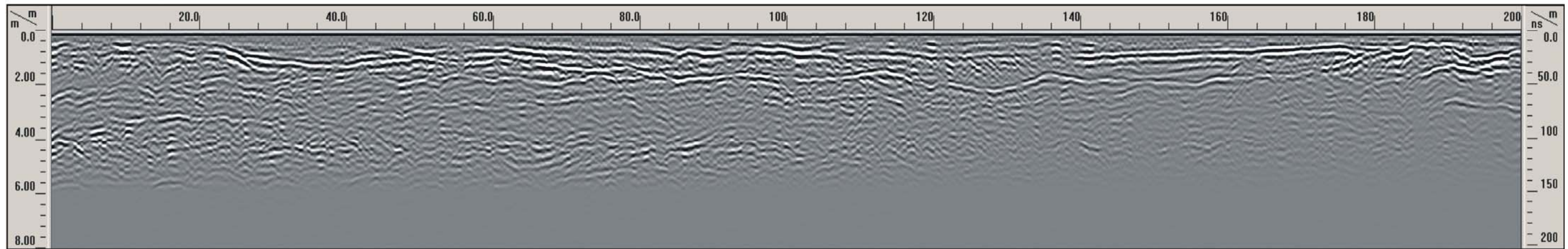


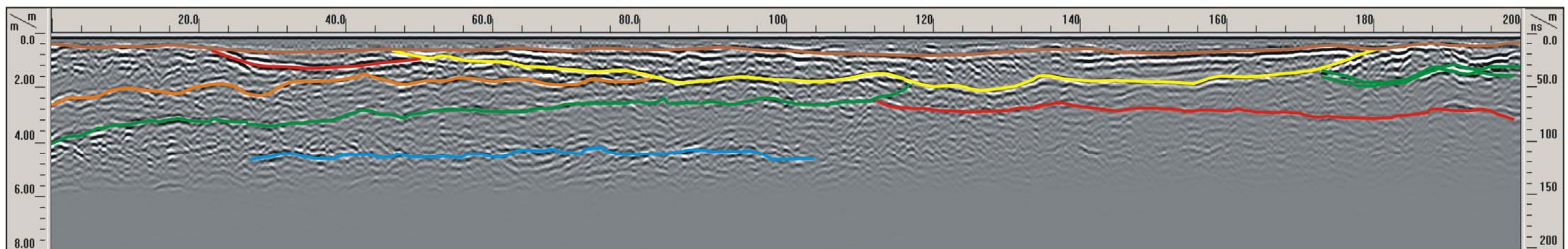
Figura 4.22 - Apresentação do perfil de reflexão 04 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 05

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

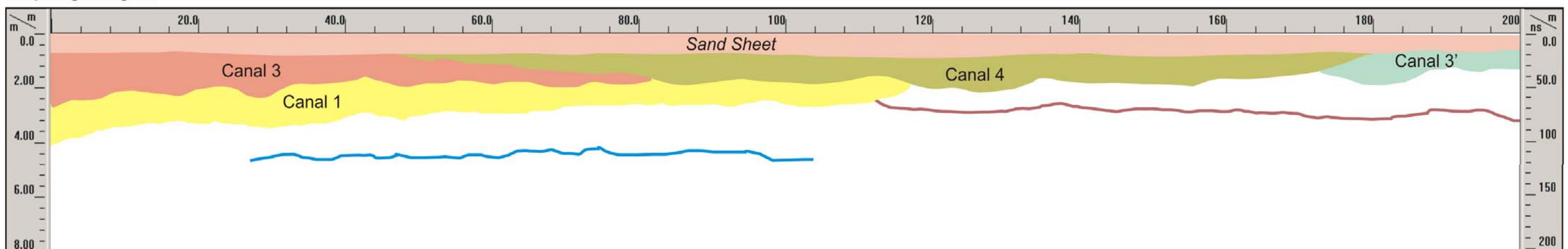
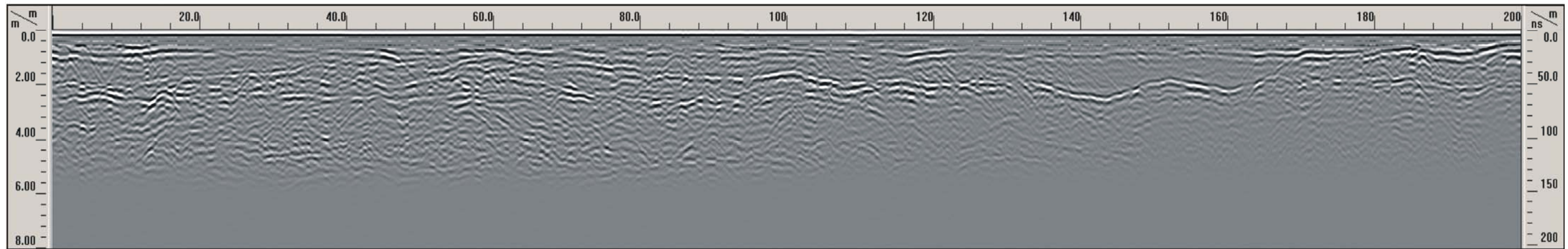


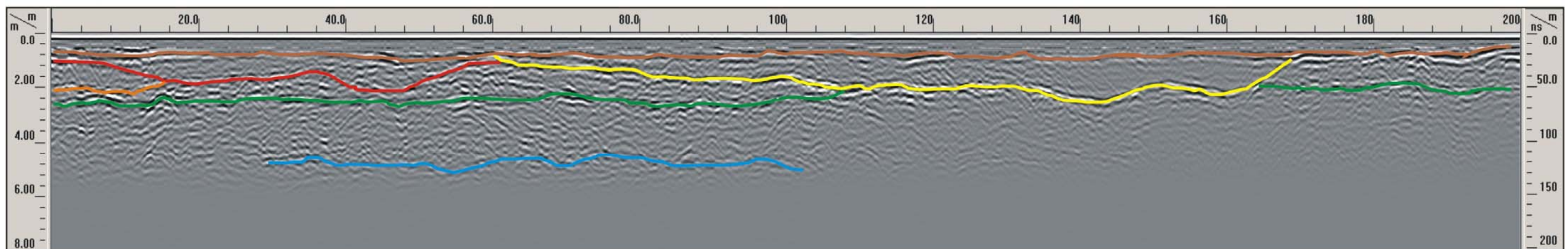
Figura 4.21 - Apresentação do perfil de reflexão 05 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 06

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

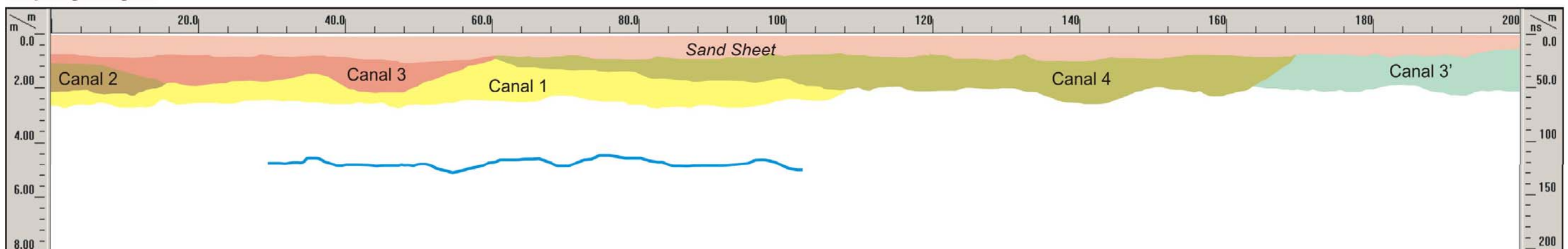
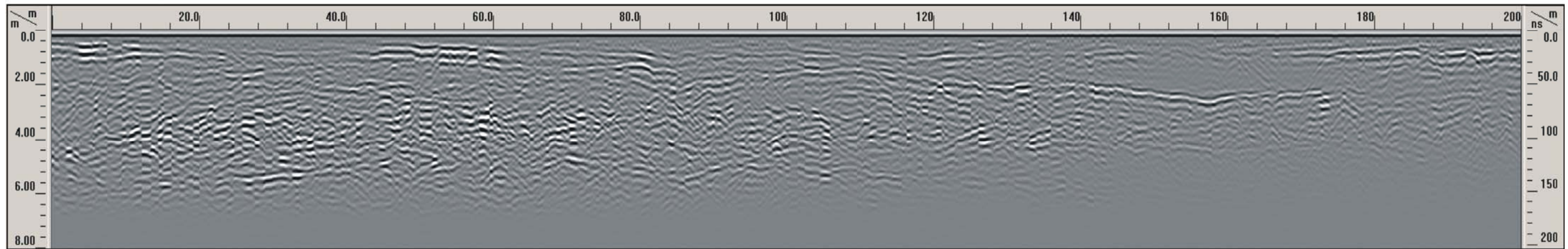


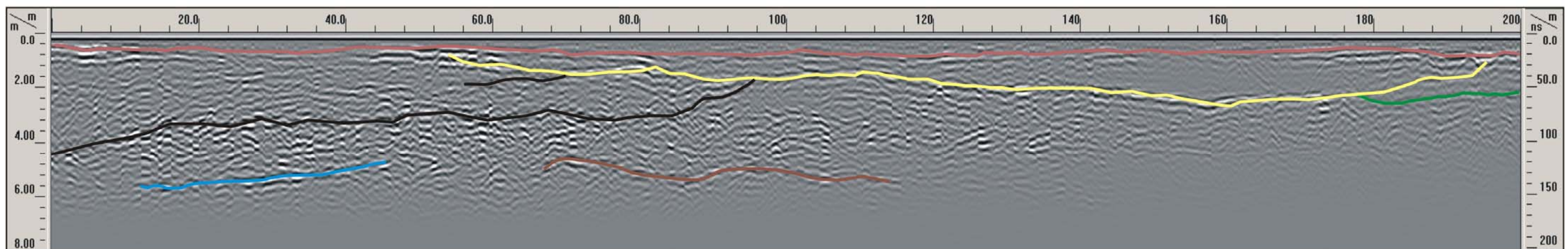
Figura 4.22 - Apresentação do perfil de reflexão 06 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 07

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

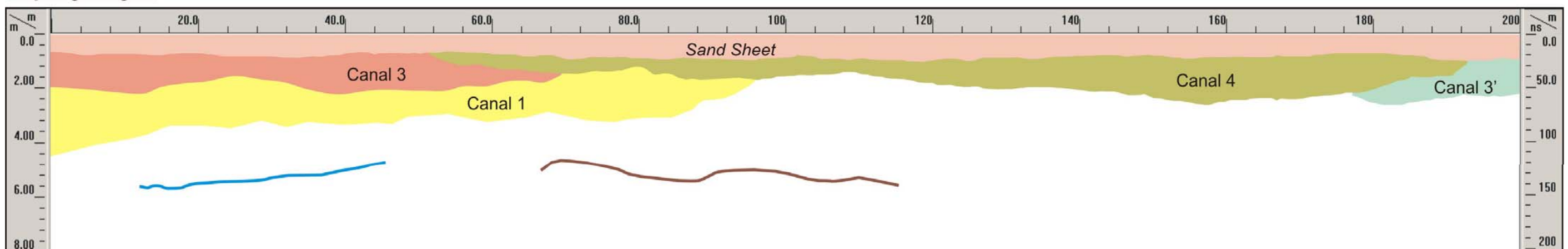
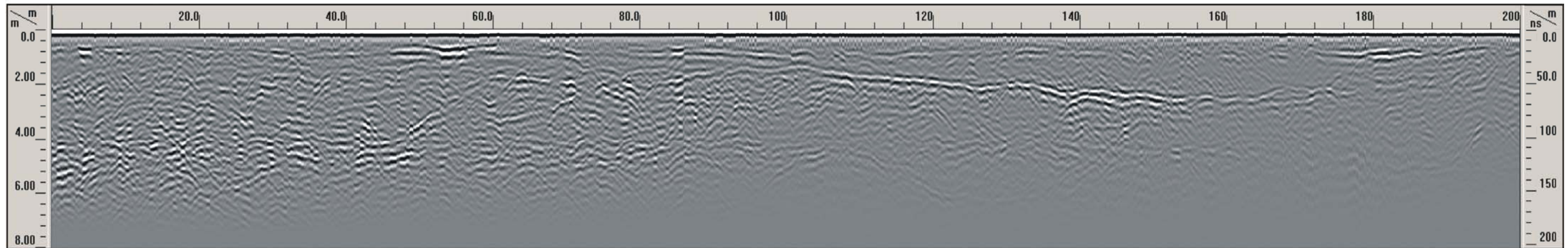


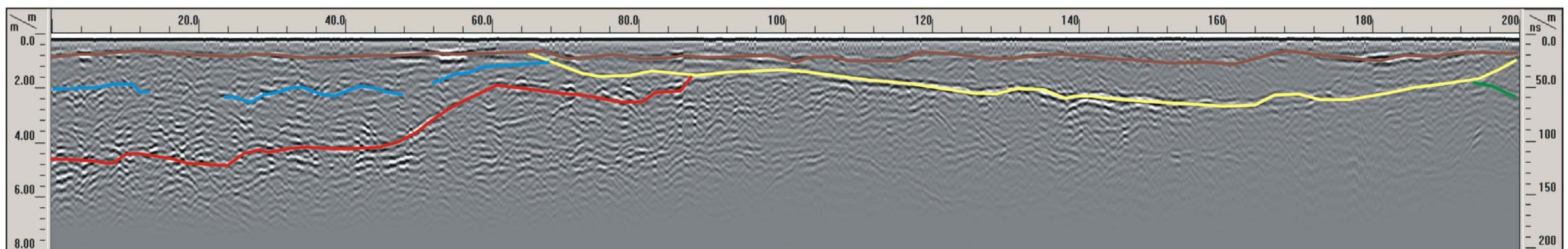
Figura 4.23 - Apresentação do perfil de reflexão 07 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 08

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

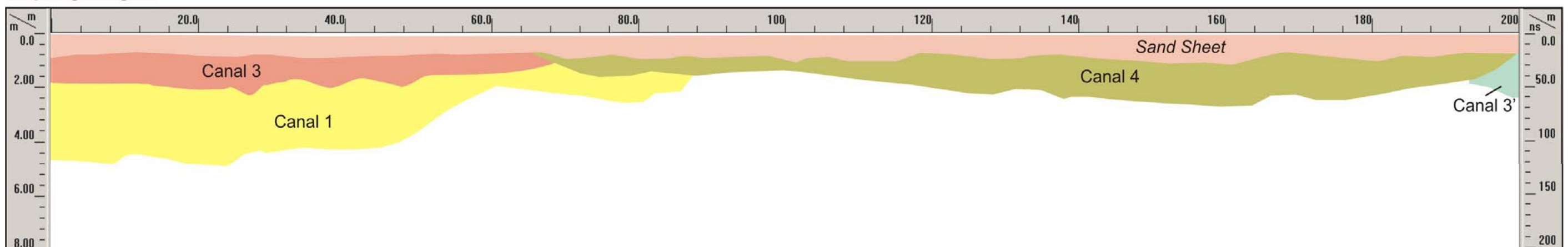
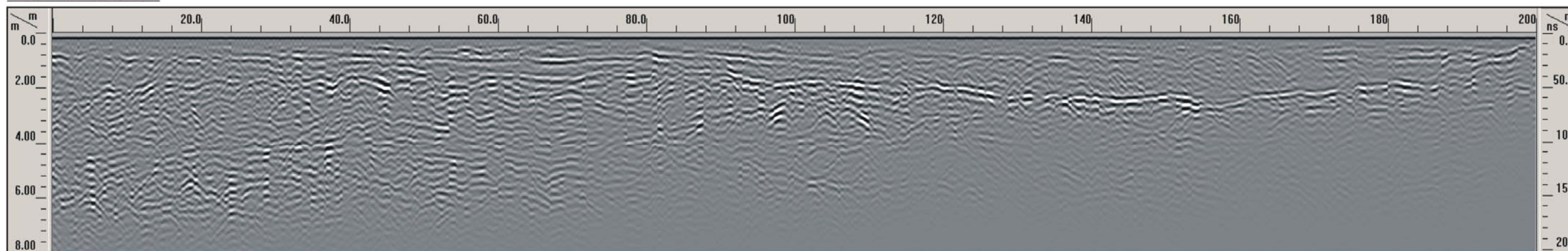


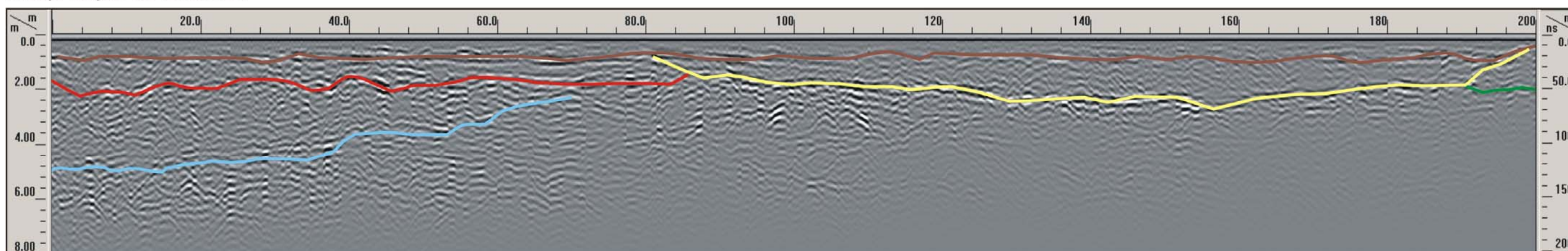
Figura 4.24 - Apresentação do perfil de reflexão 08 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

PERFIL 09

Perfil de reflexão



Interpretação de refletores



Seção geológica

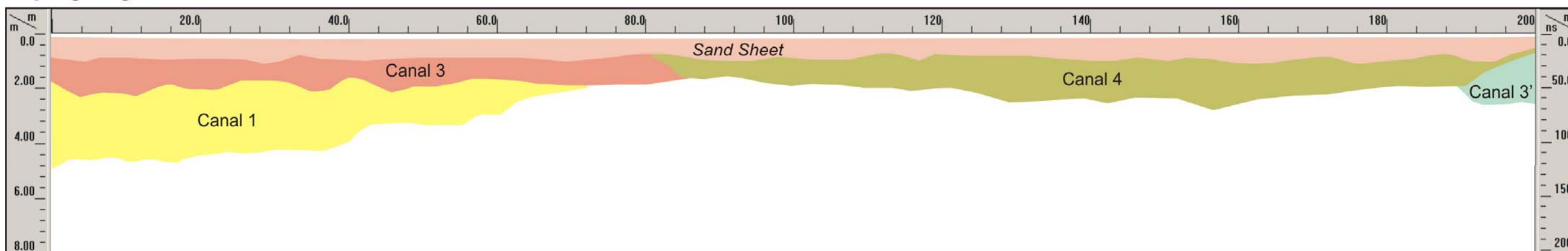
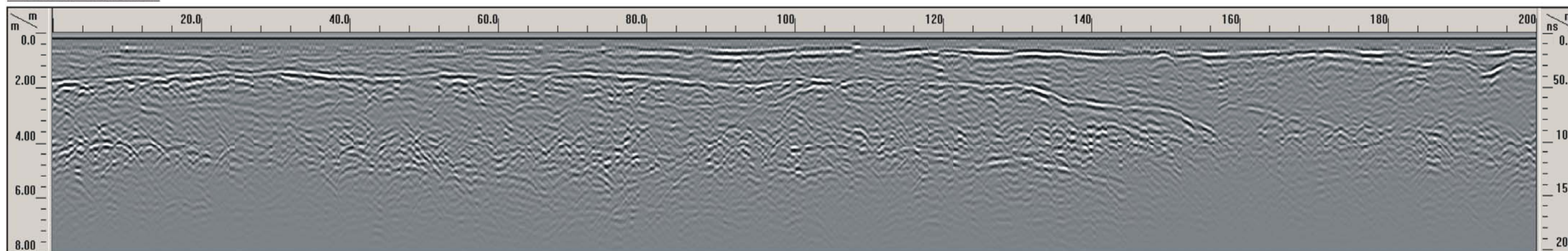


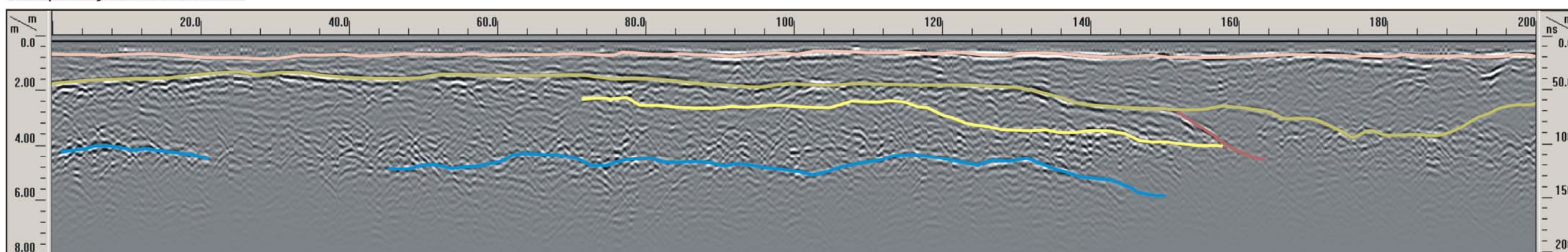
Figura 4.25 - Apresentação do perfil de reflexão 09 com respectivas interpretações de refletores e dos corpos sedimentares.

PERFIL 10

Perfil de reflexão



Interpretação de refletos



Seção geológica

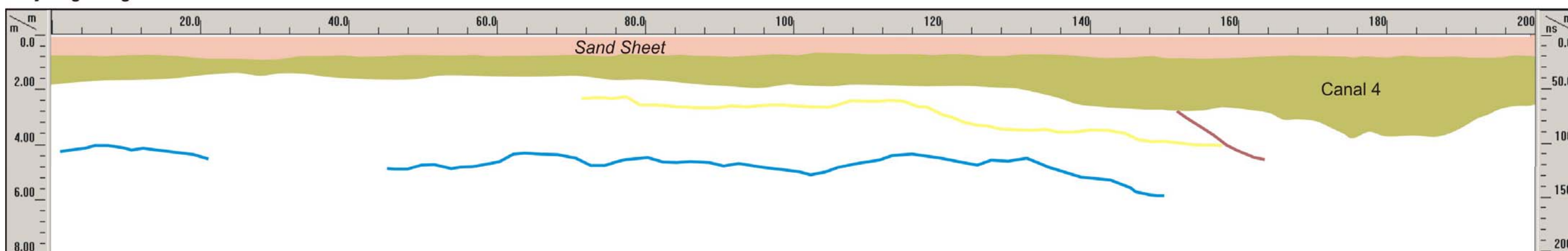


Figura 4.26 - Apresentação do perfil de reflexão 10 com respectivas interpretações de refletos e dos corpos sedimentares.

4.4 – MODELOS DIGITAIS

Os modelos digitais foram construídos no *software* GoCad versão 2.0.8. O GoCad (*Geological Object Computer Aided Draw*) foi criado em 1989, por pesquisadores do Grupo de Ciência da Computação da Escola Nacional de Geologia, em Nancy na França. Hoje, este programa se consolida como um consórcio internacional, com a participação das principais empresas da indústria petrolífera mundial, universidades, fornecedores de equipamentos e de aplicativos para o segmento Exploração e Pesquisa (E&P).

O GoCad é considerado um dos principais programas de modelagem geológica 3D disponível no mercado. Nele podem ser criados modelos complexos para aplicações em geologia, geofísica e engenharia de reservatórios. Neste programa podem ser integrados dados de sísmica, de produção, de geoestatística, de poços, entre outros, de forma a subsidiar a construção dos modelos 3D.

O grande número de usuários, nas mais diversas atividades, fez com que o GoCad trabalhasse com variados tipos de arquivos e extensões (ArcView, AutoCad, Landmark, Norsar, Oilfield Systems, Paradigm Geophysical, Roxar, arquivos ASCII, etc.). Este modelador incorpora dados que podem ser visualizados como objetos, denominados de *pointsets*, *curves* e *surfaces* que representam entidades vetoriais caracterizados, respectivamente, por pontos, linhas e polígonos. Outros objetos como *voxets*, *sgrid* e *wells* também estão disponíveis no GoCad. Além de visualizar, os dados podem ser manipulados dentro de um domínio tridimensional.

Alguns grupos de pesquisa estão utilizando esta ferramenta para geração de modelos tridimensionais de afloramentos. Dentre estes o grupo de estudo de análogos da Universidade do Texas-Dallas, comandado pelo pesquisador Janok Bhattacharya é uma referência obrigatória.

No modelo do afloramento BP/A-3/14 foram integrados dados de GPS, de Estação Total, de LIDAR, de perfis de GPR e de fotomosaicos digitais de alta resolução. Para contextualização geológica do afloramento foram agregados no modelo dados obtidos durante a etapa de elaboração da arquitetura deposicional da Unidade Açu-3.

Para contextualizar o afloramento foram importados os arquivos (*shape file*) do mapa geológico e do MDT, além de imagens LandSat e Ikonos disponibilizadas no SIG. O arquivo do mapa geológico da área selecionada entrou como objeto *surface* e o MDT como *pointset*. As imagens entraram com *voxet* 2D e foram georreferenciadas. A *surface* plana referente ao mapa geológico foi sobreposta ao

pointset do MDT, sendo em seguida suavizada. Na superfície gerada, representando o MDT da área selecionada com a projeção do mapa geológico, foram realizadas *drape* das imagens de satélites. Por fim, foram criadas superfícies laterais verticalizadas e uma horizontal para apresentar o produto como um bloco diagrama (figura 4.27).

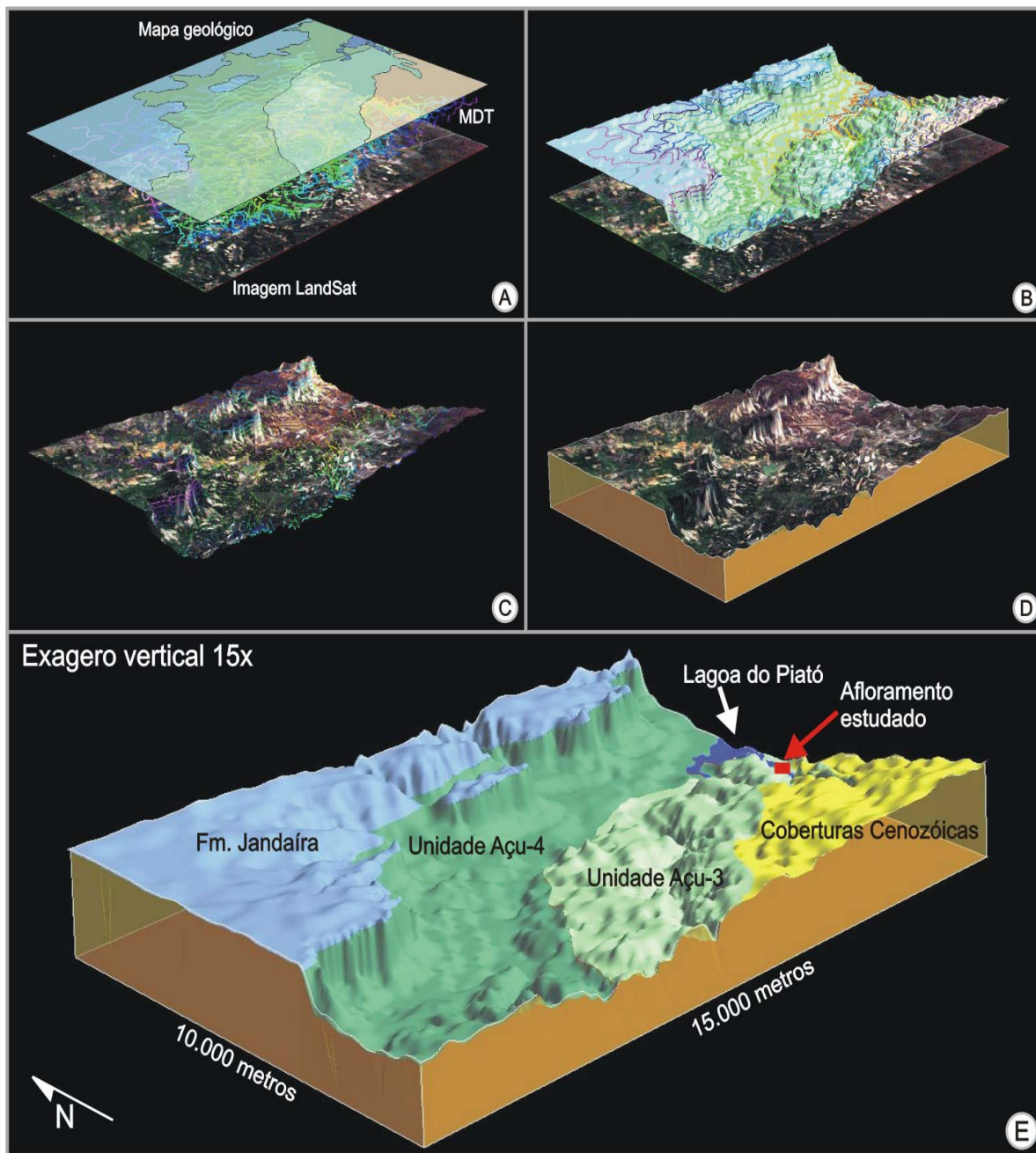


Figura 4.27 – Etapas envolvidas na construção do modelo de contextualização do Afloramento. (A) Entrada de dados no GoCad; (B) Superposição da geologia no MDT; (C) *Drape* da imagem LandSat no MDT; (D) Geração das laterais e piso do bloco diagrama; (E) Representação tridimensional das unidades geológicas da área selecionada com a localização do afloramento.

No afloramento, os dados plani-altimétricos obtidos com *Laser Scanner*, GPS e Estação Total foram introduzidos como *pointset*, a partir de arquivos ASCII. Os perfis GPR foram inseridos e georreferenciados no GoCad como *voxet 2D*, os fotomosaicos digitais também entraram como este tipo de objeto, a partir de imagens formato *.jpg.

Com base nos dados plani-altimétricos foram geradas *surfaces* para criar o modelo digital do afloramento. Os dados da escarpa do afloramento adquiridos com *Laser Scanner* foram inseridos por cena, devido a grande densidade de pontos. Mesmo assim, houve a necessidade de reduzir a quantidade de pontos, pois geravam *surfaces* densas de difícil rederização. Para geração das *surfaces*, das cenas do *Laser Scanner*, foram criadas curvas de borda para cada cena. As superfícies foram geradas usando um vetor de rebatimento ortogonal à nuvem de pontos das cenas (figura 4.28).

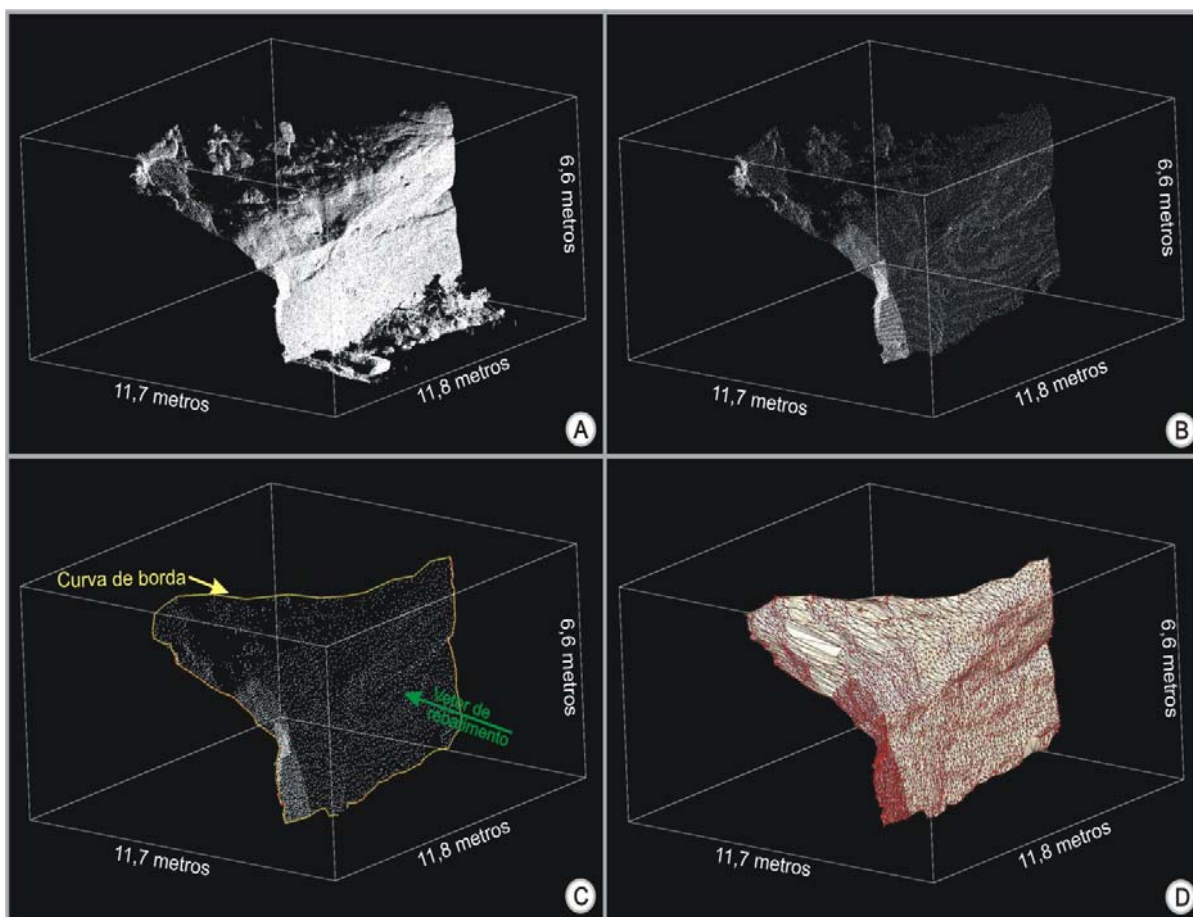


Figura 4.28 – Procedimentos para criar surface de uma cena do Laser Scanner: (A) Nuvem de pontos da cena 01; (B) Redução da densidade de pontos; (C) Definição de curva de borda e vetor de rebatimento; (D) *Surface* gerada mostrando a triangulação.

A distribuição dos pontos adquiridos com as respectivas ferramentas utilizadas para imagear o afloramento, bem como o modelo digital do afloramento, estão apresentados na figura 4.29.

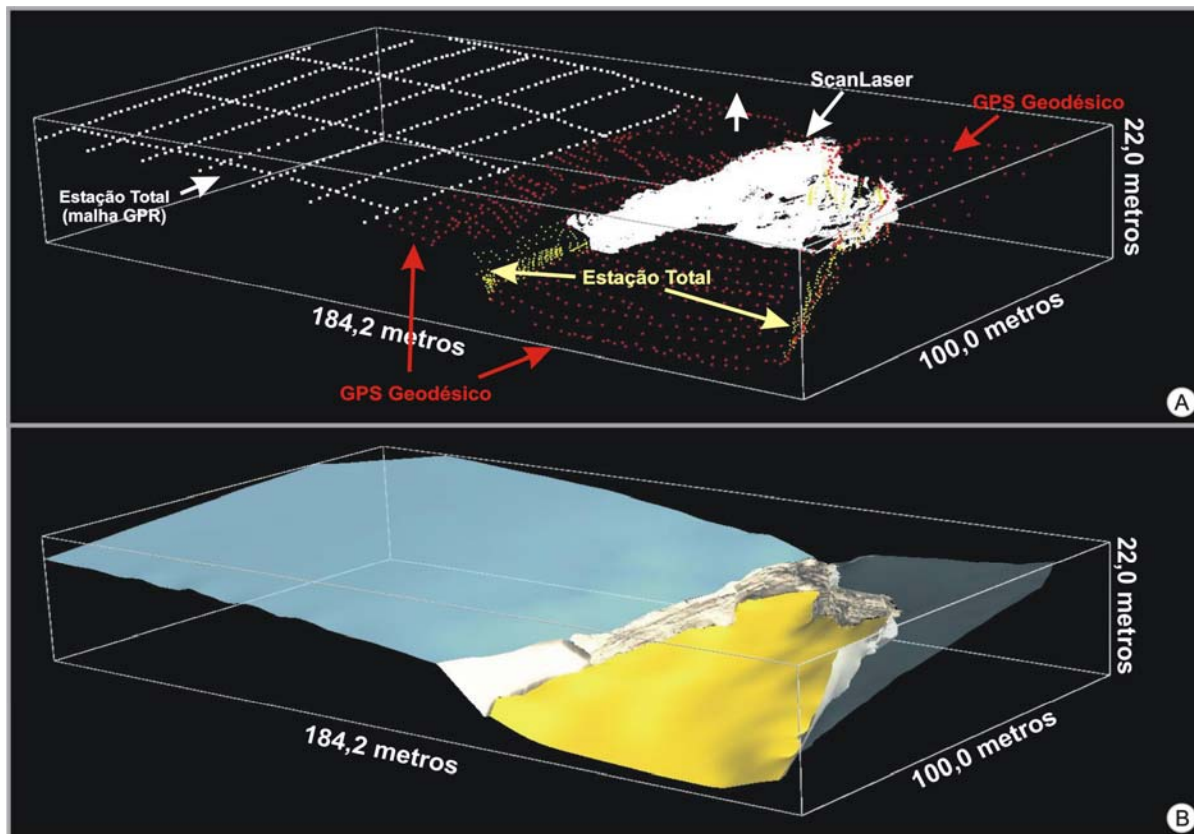


Figura 4.29 – (A) Distribuição dos pontos e respectivas ferramentas utilizadas para imagear o afloramento; (B) Modelo digital do afloramento.

Com base nos dados do *Laser Scanner* e fotomosaicos foi construído um Modelo Fotorealístico de parte da escarpa do afloramento. O fotomosaico apresentado na figura 3.25 foi convertido em imagem de 8 bits (tons de cinza). Optou-se trabalhar com imagens em tons de cinza por surgirem problemas durante a renderização de imagens 24 bits. Houve a necessidade também de segmentar o fotomosaico em várias partes, para diminuir as distorções geradas pela irregularidade da escarpa. Assim, cada segmento foi individualizado em função do tamanho da cena do *Laser Scanner*. Cada uma das imagens foi importada e georreferenciada como um objeto individual. Os segmentos dos fotomosaicos foram sobrepostos às *surfaces* do *Laser Scanner*, por meio da ferramenta *drape*. O produto final é uma representação do afloramento no domínio tridimensional. Os passos para construção do Modelo Fotorealístico são mostrados na figura 4.30.

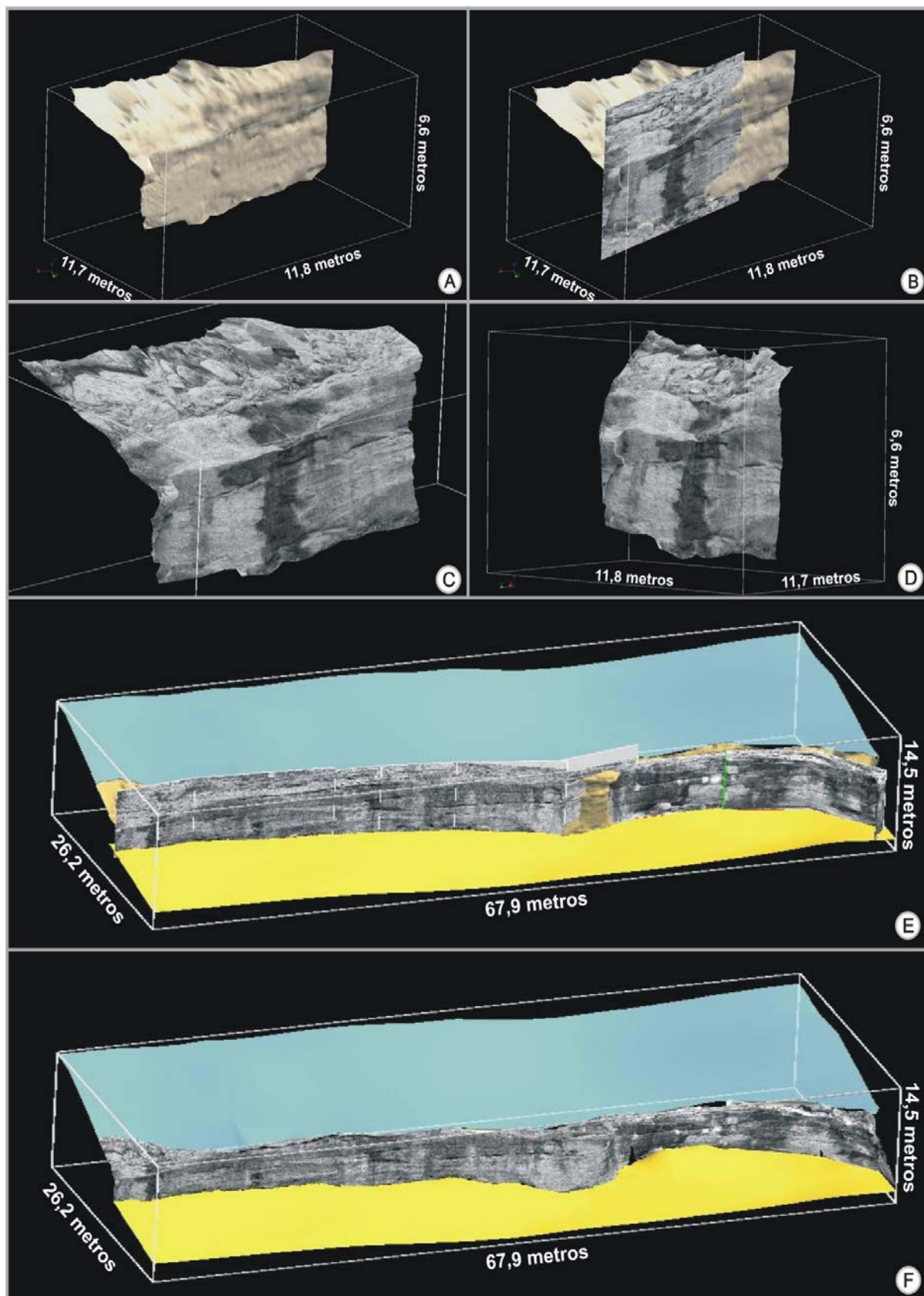


Figura 4.30 – Etapas utilizadas na construção do Modelo Fotorealístico; (A) *Surface* da cena 01; (B) Entrada e georreferenciamento do segmento 01 do fotomosaico; (C) e (D) *Drape* da imagem na *surface*; (E) Entrada e georreferenciamento de todos os segmentos do fotomosaico; (F) Modelo Fotorealístico.

No modelo não foi representada a distribuição tridimensional dos corpos sedimentares, por ausência de dados geométricos deposicionais em subsuperfície. Assim, o produto final de modelamento é o Modelo Fotorealístico de parte da escarpa (figura 4.31).

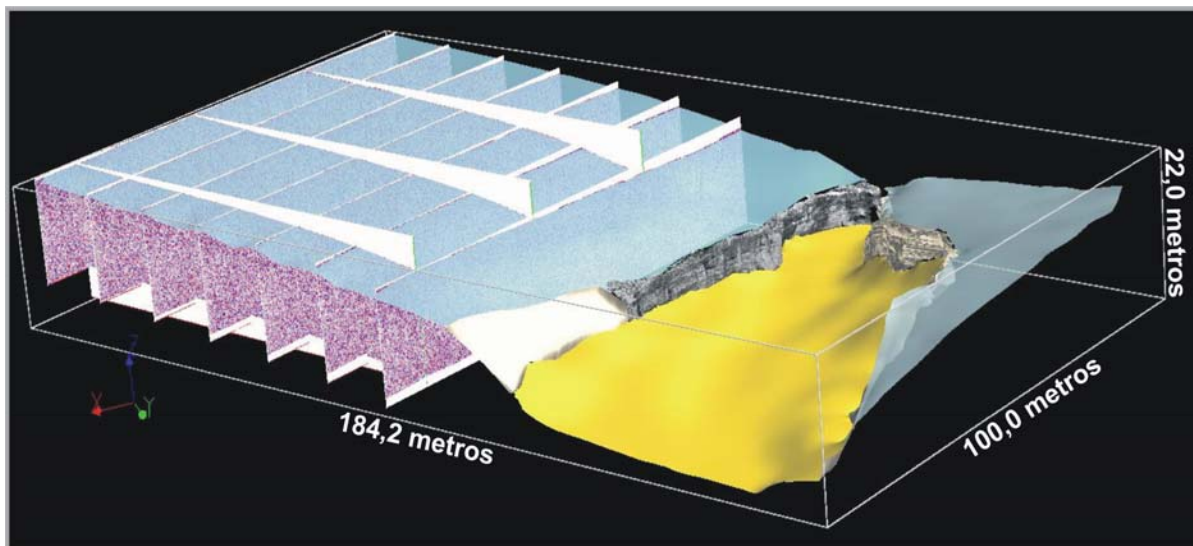


Figura 4.31 – Produto obtido no modelamento do afloramento.

O mesmo procedimento adotado para modelar o afloramento também foi utilizado para contextualizar o modelo do Rio Assu (figura 4.32). Na contextualização foram usados dados topográficos para gerar uma *surface* representando o MDT e sobrepostas imagens de satélites. Foi criado ainda um objeto *curve* mostrando a distribuição e a localização da malha de GPR (figura 4.33).



Figura 4.32 – Dados utilizados na contextualização do modelo do Rio Assu.

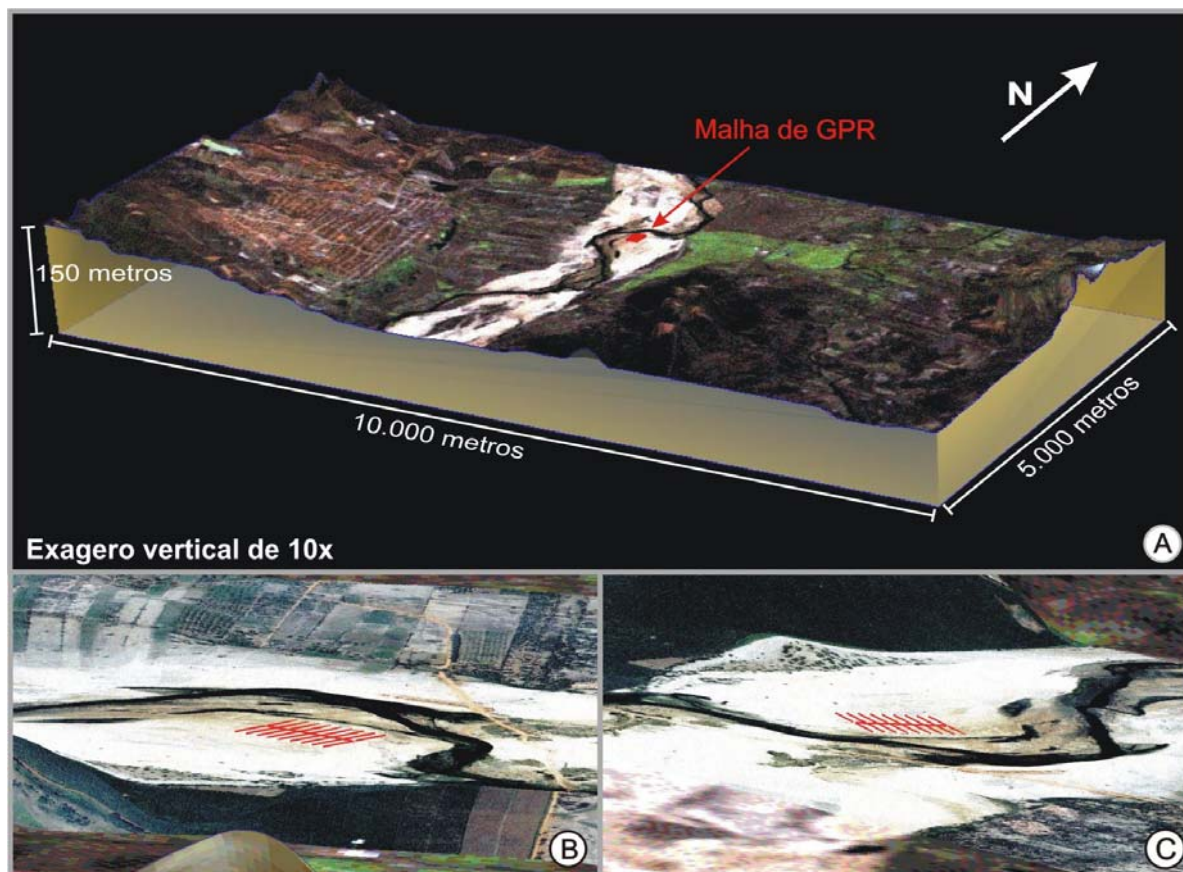


Figura 4.33 – (A) Contextualização regional do modelo gerado no Rio Assu; (B) e (C) Detalhe da malha de GPR levantada no Rio Assu.

Na construção do modelo do Rio Assu foram importadas e georreferenciadas imagens formato *.jpg, referentes aos perfis de reflexão e suas interpretações geológicas. Com base nas interpretações foram criados objetos (*point sets*) relacionados aos limites de cada corpo interpretado.

Posteriormente, foram geradas *surfaces* a partir do rebatimento de uma superfície plana, que extrapolava a malha de GPR, sobre o *point set* referente a um limite específico. As *surfaces* criadas foram então suavizadas e cortadas por planos verticais que contornavam a malha de GPR. Após este procedimento as *surfaces* foram novamente cortadas, de forma a respeitar o empilhamento e truncamento entre os corpos sedimentares interpretados com os dados de GPR. Por fim, foram construídas superfícies representando as laterais, topo e base da malha de GPR. Neste modelamento, obteve-se a distribuição da geometria dos corpos sedimentares dentro de um domínio tridimensional. As etapas referentes ao desenvolvimento do modelo digital do Rio Assu são mostradas na figura 4.34.

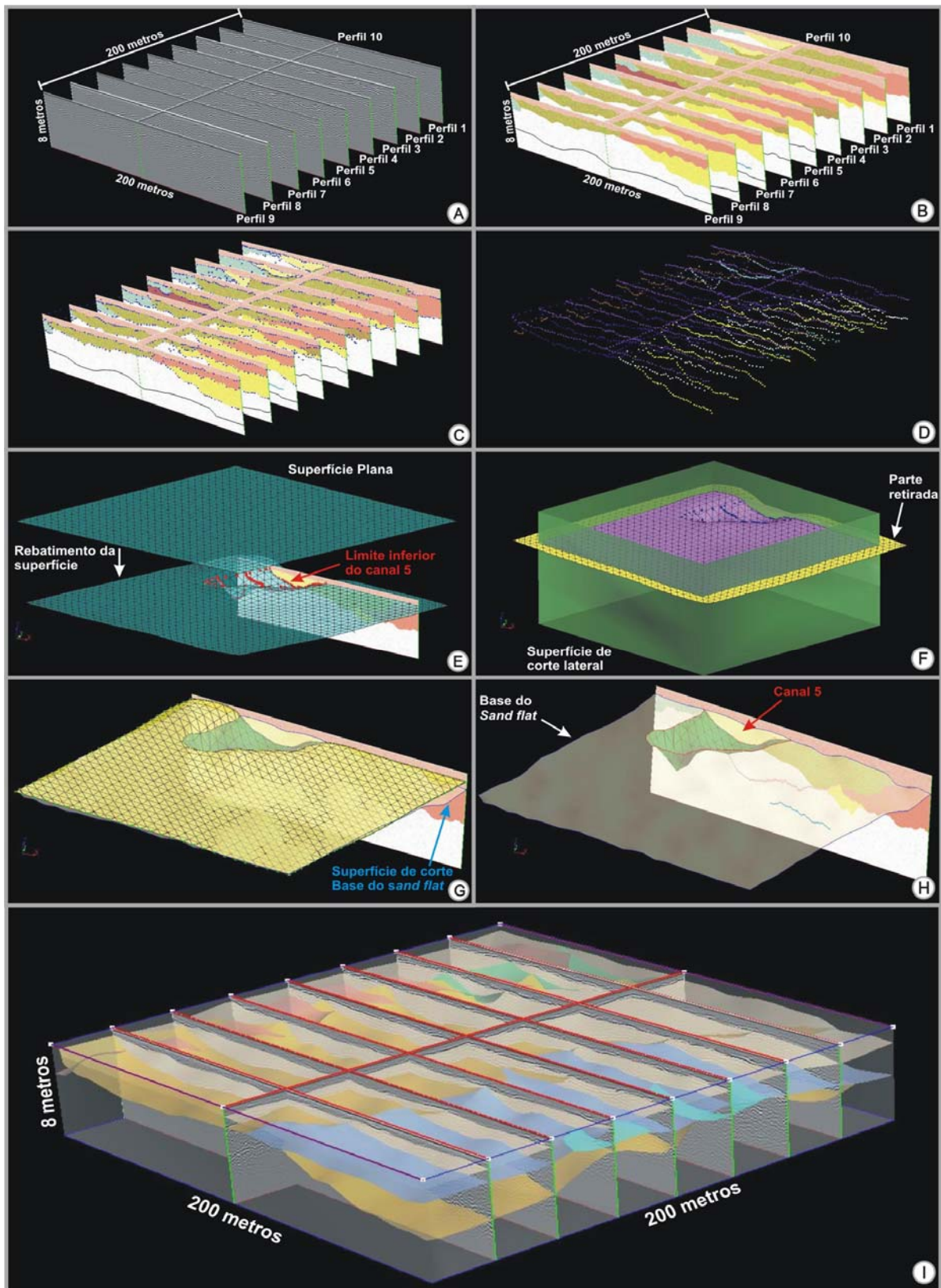


Figura 4.34 – Etapas desenvolvidas para construção do modelo digital realizado no Rio Assu: (A) e (B) Importação e georreferenciamento de imagens referentes aos perfis de reflexão de GPR e as suas interpretações. (C) Geração de *point sets* a partir das interpretações dos perfis de reflexão. (D) Conjunto de *point sets* dos limites dos corpos sedimentares. (E) Rebatimento de *surface* plana no *point set* referente ao limite inferior do canal 5. (F) Corte da *surface* por planos verticais. (G) e (H) Corte da *surface* por corpo sedimentar sobreposto ao canal 5; (I) Modelo Digital do segmento levantado do rio.

Os modelos do afloramento e do Rio Assu podem ser utilizados para quantificação de corpos sedimentares, de forma a alimentarem modeladores estocásticos orientados a objetos de reservatórios fluviais da Bacia Potiguar. O capítulo a seguir apresenta uma análise da utilização da modelagem orientada a objeto em reservatórios de petróleo.

Os modelos digitais de análogos a reservatórios de petróleo também estão disponíveis para visualização em ambientes de realidade virtual. Estes modelos são ferramentas bastante úteis, pois as empresas não dispõem de tempo para encaminhar seus geólogos para o campo. Desta forma, os profissionais podem fazer visitas virtuais aos afloramentos análogos a partir destes modelos (foto 4.7).

Por fim, os modelos tridimensionais dos análogos, agregados a dados de propriedade de rocha, podem ser usados em estudos de simulação de fluxo de fluido.

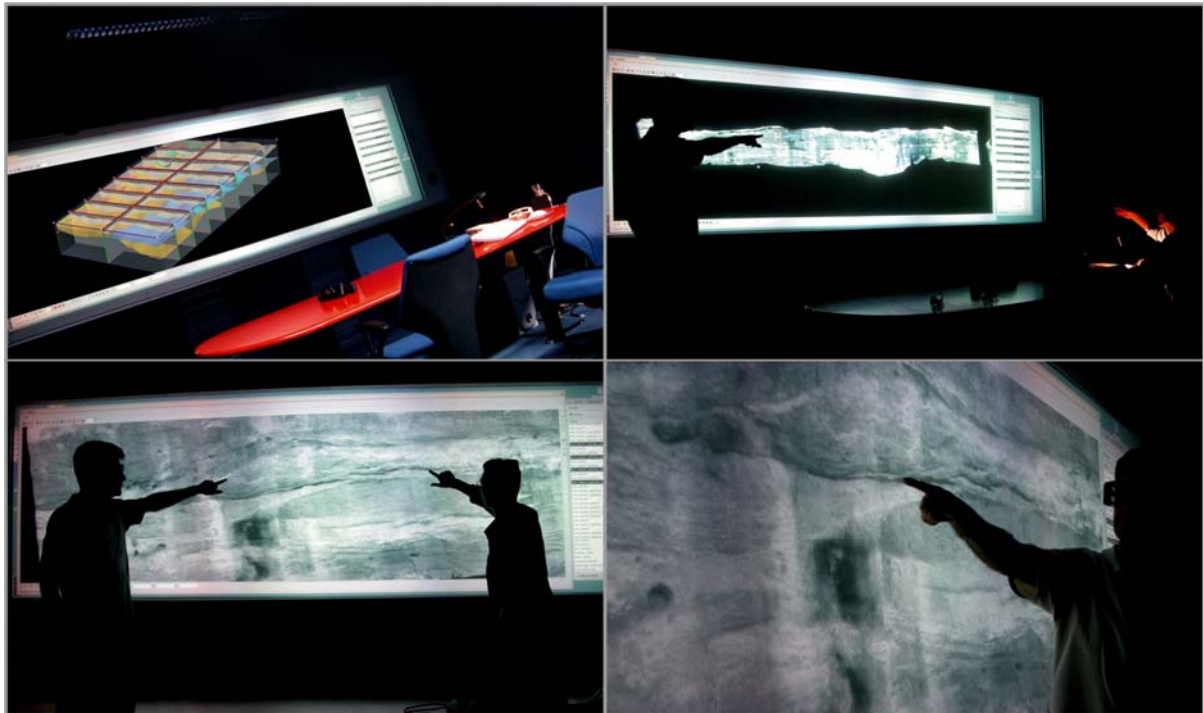


Foto 4.37 – Apresentação dos projetos na sala de realidade virtual da Petrobras UN-RN/CE.

A analogia entre os parâmetros sedimentológicos obtidos em afloramentos e os parâmetros identificados em um determinado reservatório petrolífero em subsuperfície tem possibilitado, a partir de realizações equiprováveis, a caracterização das heterogeneidades deposicionais dos reservatórios nos espaços interpoços. Desta forma, pode-se ter uma visão aproximada deste espaço por meio da mensuração de variáveis sedimentológicas, nas várias escalas das heterogeneidades presentes. Modelagens estocásticas têm sido usadas para explicar as complexas distribuições de heterogeneidades e introduzi-las em um modelo de reservatório, quantificando incertezas e substituindo técnicas determinísticas de mapeamento (MacDonald, 1999).

Pesquisas no campo produtor de Brent (Mar do Norte), confirmam que o modelo estocástico orientado a objetos fornece o melhor ajuste do histórico de produção. Os reservatórios fluviais da Formação Statfjord, nos quais se encontram as maiores acumulações de óleo e gás do mundo, constituem o berço da simulação estocástica orientada a objetos. Várias aplicações de técnicas estocásticas têm sido utilizadas na modelagem de diferentes tipos de reservatórios de petróleo (MacDonald & Halland 1993, Barton *et al.* 1995, Lanzarini *et al.* 1997; Lima Filho *et al* 2002; Polleto *et al* 2002; Menezes 2002).

Nas duas últimas décadas, diversos *softwares* (PETBOOL, SESIMIRA, SISABOSA, FLUREMO, MONARCH3D, SIRCH, STORM, SEDSIM3, MOHERES E FLUVISM) foram desenvolvidos para modelagem estocástica orientada a objetos. Contudo, é clara a falta de dados quantitativos relacionados às heterogeneidades dos reservatórios (Becker 1997). Até pouco tempo atrás, predominavam trabalhos em que as analogias eram retratadas apenas com uma visão qualitativa. O uso de parâmetros quantitativos para caracterização de heterogeneidades é, no momento, a fronteira científica nesta área de investigação.

Neste capítulo é discutida e aplicada a Modelagem Estocástica de Objetos Geométricos (MEOG), segundo a proposta de Poletto (1996). Este autor usou o *software* PetBool para simulação da arquitetura e geometria de parte de um reservatório fluvial da Formação Açu (Unidade Açu-3), na Bacia Potiguar.

O enfoque deste trabalho foi avaliar o desempenho do programa PetBool, em simulações envolvendo uma grande quantidade de poços condicionantes. As simulações foram realizadas na Gerência de Caracterização e Estudos Especiais de Reservatório da Petrobras UN-RNCE, sob orientação dos geólogos Carlos Alberto Poletto, João de Deus Souto Filho e Alexandre Gonçalves de Melo.

5.1 - PETBOOL

O PetBool 3.0 é um *software* de modelagem geométrica e simulação estocástica de feições discretas, tais como, unidades genéticas e heterogeneidades diagenéticas dos reservatórios. Com a combinação de métodos estocásticos e geométricos, disponíveis no PetBool, torna-se possível obter realizações equiprováveis da arquitetura do reservatório.

As unidades genéticas presentes no PetBool são representadas por: canais (fluviais e turbidíticos), domos, dunas, lentes, lençóis de areia e lobos. Na simulação, apenas um tipo de unidade genética é gerado, sendo cada unidade definida por parâmetros específicos.

Durante a simulação os objetos são gerados aleatoriamente, independentes entre si, podendo “sobrepôr” e “erodir” outros objetos. No entanto, para que o modelo possa ser validado, os objetos gerados devem respeitar os histogramas experimentais dos dados parametrizados e os dados do reservatório que será simulado.

Durante a simulação são impostas restrições, onde a densidade de objetos gerados deve respeitar os condicionamentos da curva de proporção vertical de fácies, curva de proporção horizontal de fácies ou proporção global, proporções estas obtidas a partir dos dados de poços do domínio simulado. Outra restrição imposta durante a simulação é o condicionamento a poço, sendo o objeto rejeitado quando intercepta um intervalo de fácies não-reservatório de um poço do domínio simulado (figura 5.1).

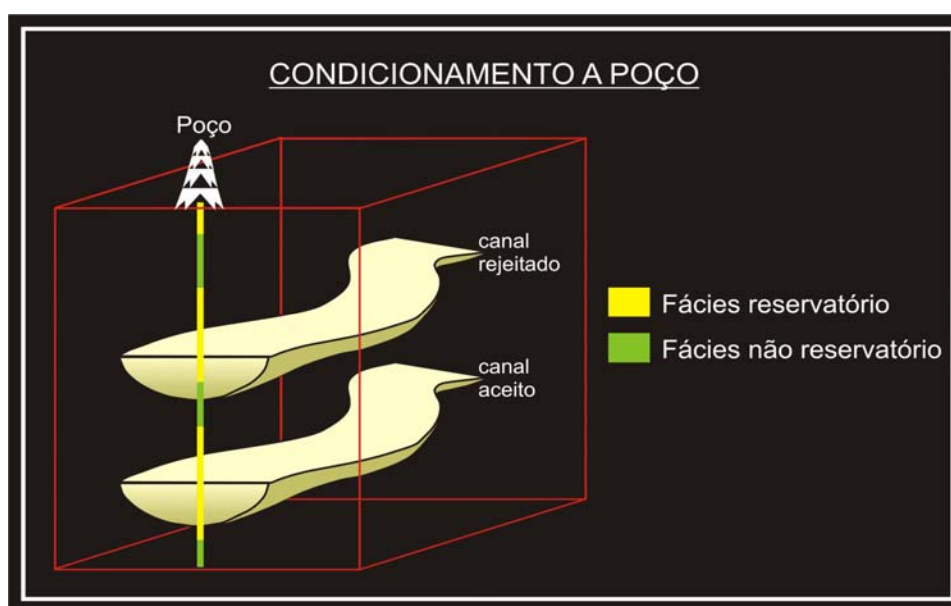


Figura 5.1 – Representação esquemática do condicionamento a poço.

A curva de proporção vertical de fácies (CPVF) representa a distribuição global das percentagens de cada litofácies. Para calcular a CPVF é especificado um *datum* horizontal, sendo obtido os percentuais das litofácies nível a nível, em profundidades constantes (Poletto, 1996; Eschard *et al.*, 1998) (figura 5.2).

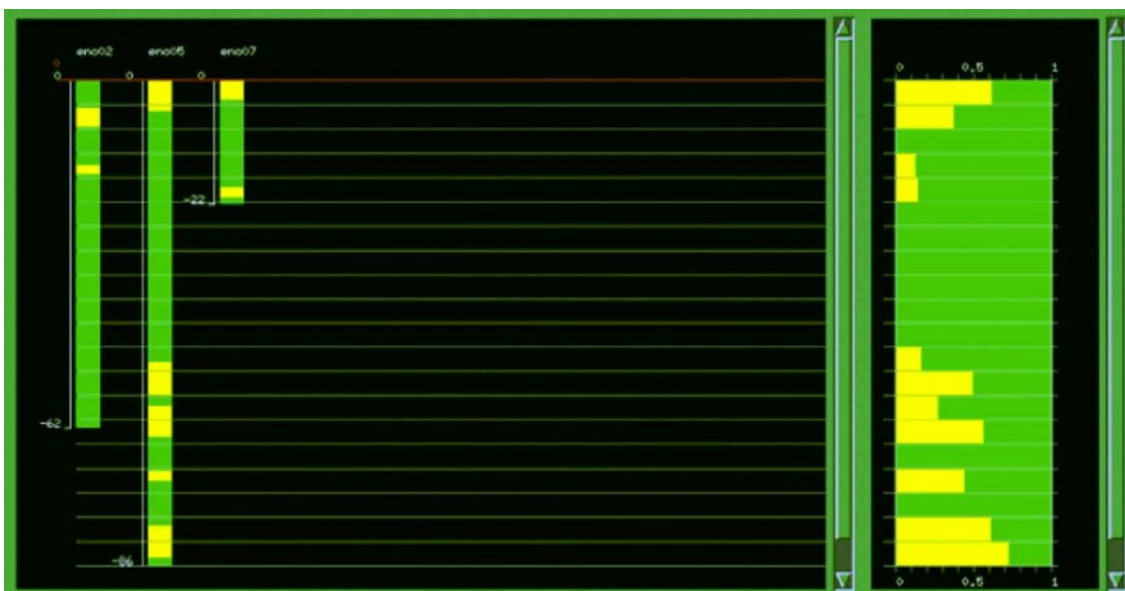


Figura 5.2 – Curva de proporção vertical de fácies (CPVF), realizada com base em três poços verticais, contendo 20 intervalos. Modificado do guia do usuário do PetBool 3.0.

No PetBool as realizações equiprováveis podem ser visualizadas em uma janela (OpenGL), sendo possível visualizar e navegar ao longo do domínio simulado. Com uso de óculos especiais é possível a visualização dos objetos em três dimensões.

O Projeto PetBool vem sendo desenvolvido desde 1995 por pesquisadores do Laboratório Matmídia do Departamento de Matemática da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), onde sua especificação geológica é continuamente atualizada por profissionais do CENPES e UN-RNCE da PETROBRAS e do Grupo de Estudo de Análogos da UFRN (GEA-UFRN).

5.2 – DADOS DE ENTRADA

Para a realização da simulação da arquitetura do reservatório usando o PetBool é necessário carregar o programa com os **Dados dos Poços** e com **Histogramas Experimentais** dos parâmetros do canal fluvial. É imprescindível também a definição do **Domínio**, **Referência do Poço** e **Restrições** da simulação.

5.2.1 - DADOS DOS POÇOS

A partir dos dados dos poços são criados arquivos-texto seguindo uma formatação específica (anexo 2), de forma a apresentar as fácies reservatório e não-reservatório ao longo do poço.

Com a finalidade de avaliar o desempenho do programa PetBool, foram criados seis grupos de simulações, em três domínios distintos. Para cada domínio usou-se uma malha de poços adensada e outra não-adensada, realizando simulações com dezenas a centenas de poços condicionantes. As malhas adensadas apresentam aproximadamente o dobro de poços em relação às não-adensadas (tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Dados dos projetos criados para o teste de desempenho do Petbool.

| | NOME DO PROJETO | | Número de poços condicionados | Dimensão do domínio |
|---------|--------------------|----------------|-------------------------------|---------------------|
| | Malha não-adensada | Malha adensada | | |
| GRUPO 1 | CAM22Pdom_1 | | 22 | 1500 x 1000 x 35m |
| GRUPO 2 | | CAM42Pdom_1 | 42 | 1500 x 1000 x 35m |
| GRUPO 3 | CAM65Pdom_2 | | 65 | 2500 x 2000 x 35m |
| GRUPO 4 | | CAM127Pdom_2 | 127 | 2500x 2000 x 35m |
| GRUPO 5 | CAM153Pdom_3 | | 153 | 4475 x 2950 x 42,8m |
| GRUPO 6 | | CAM297Pdom_3 | 297 | 4475 x 2950 x 42,8m |

5.2.2 - HISTOGRAMAS EXPERIMENTAIS

Poletto (1996) propôs a modelagem geológica orientada a objeto, para reservatórios de canais fluviais, com base na parametrização de um modelo detalhado de subsuperfície para Formação Açu, definido por Santos e Poletto, (1993; *apud* Poletto 1996). Na proposta de Poletto *op cit.* o canal fluvial é definido pelos parâmetros: espessura, largura, sinuosidade e direção; para simplificação do modelo a declividade foi desconsiderada (figura 5.3).

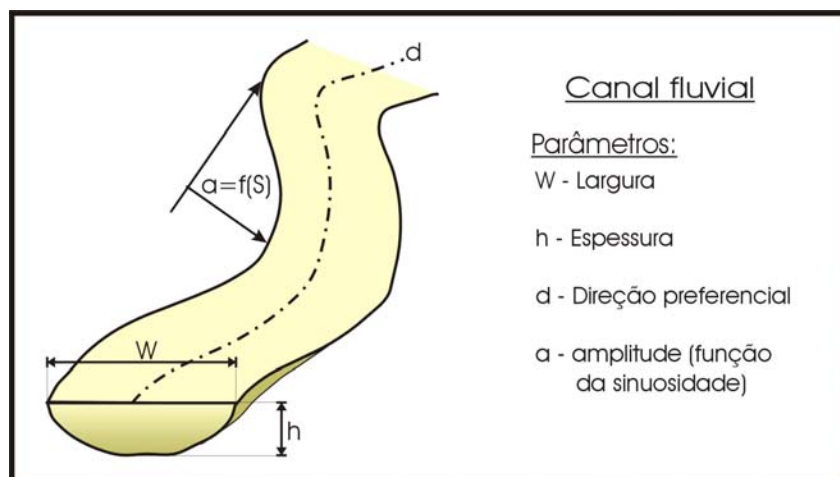


Figura 5.3 – Parâmetros que definem um canal fluvial em três dimensões. Modificado de Lanzarini et al. (1995) e Poletto (1996).

Nas simulações geradas neste trabalho foram utilizados os mesmos parâmetros adquiridos por Poletto (1996), pois o reservatório simulado é o mesmo usado em sua pesquisa. O parâmetro largura é uma função da espessura pela equação $W = 16,372H^{1,54}$; os histogramas de Espessura (H), Sinuosidade (S) e Direção (D) são apresentadas na figura 5.4.

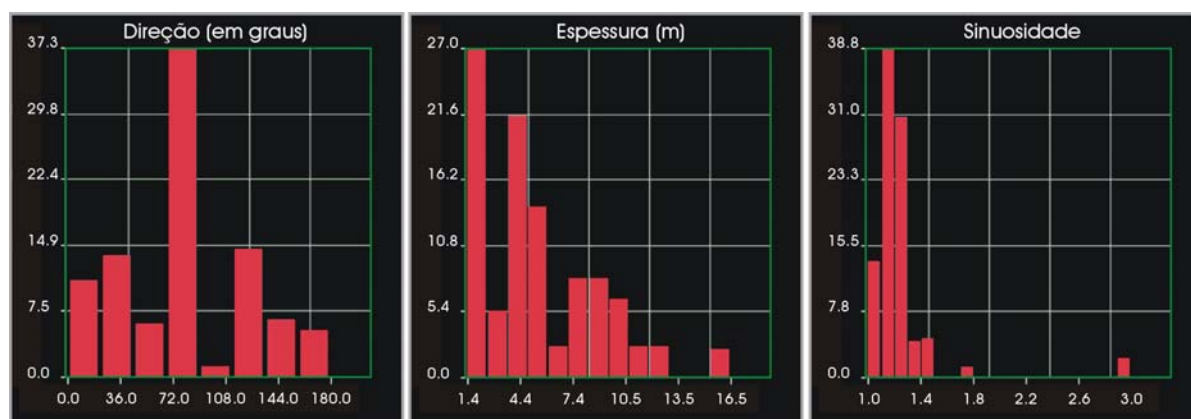


Figura 5.4 – Histogramas experimentais gerados a partir da parametrização de um modelo determinístico de um reservatório da Bacia Potiguar, Poletto (1996).

5.2.3 - DOMÍNIO, REFERÊNCIA E RESTRIÇÕES DA SIMULAÇÃO

O **Domínio** da simulação foi definido utilizando a ferramenta *Auto domain from wells*, onde o **Domínio** gerado envolve todos os poços de forma a ocupar o menor volume. Os poços foram alinhados pelo **Marco de Referência** usando a ferramenta *reference/top*.

Em função da grande quantidade de poços, todas as realizações equiprováveis geradas foram exclusivamente condicionadas aos poços.

5.3 - REALIZAÇÕES EQUIPROVÁVEIS DA GEOMETRIA DO RESERVATÓRIO

Foram gerados no total 45 simulações (figura 5.5). O tempo de simulação e o número de canais gerados aumentavam em função da quantidade de poços condicionantes. De maneira geral, em um mesmo domínio, o tempo gasto e o número de canais gerados foi o dobro para o grupo de malha adensada de poços em relação ao grupo de malha não-adensada (figura 5.6).

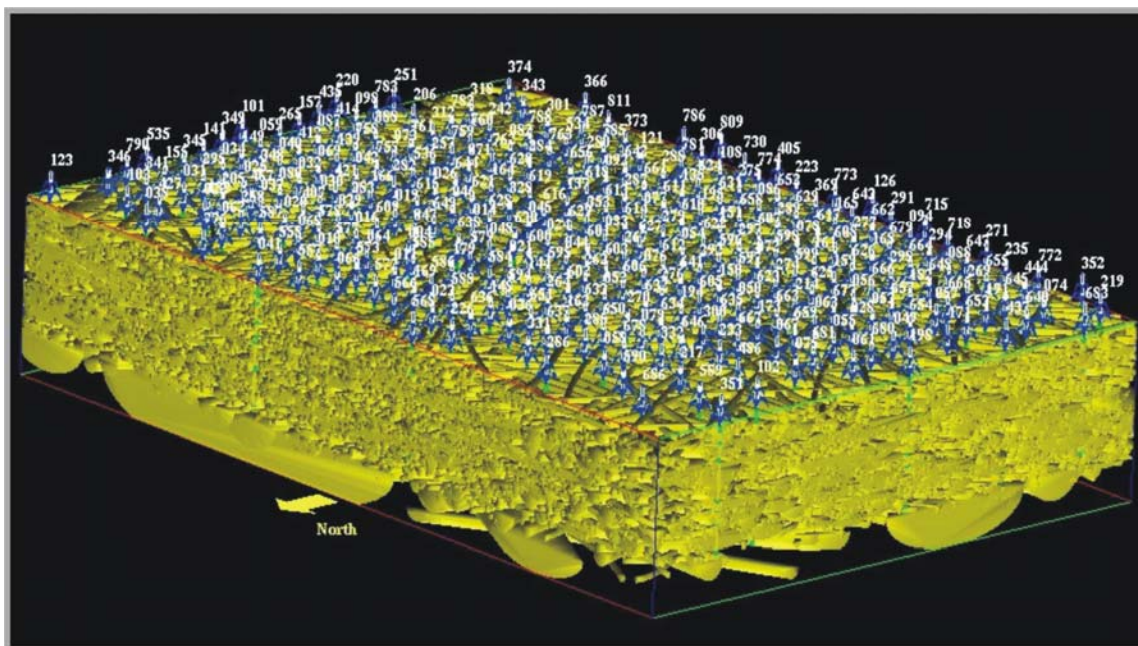


Figura 5.5 – Distribuição equiprovável de canais para simulação realizada com 297 poços condicionantes.

As simulações do grupo com 297 poços condicionantes apresentaram a maior variação de tempo nas cinco realizações equiprováveis. O motivo desta variação pode estar relacionado à velocidade de transmissão de dados da rede durante a simulação, pois estas foram de longa duração, envolvendo mais de uma hora. A execução destas cinco simulações foi realizada em mais de um dia de trabalho.

A partir da análise dos resultados das simulações observou-se que, para o mesmo domínio, o número de canais gerados em malhas adensadas é aproximadamente o dobro em relação às malhas não-adensadas, como comentado anteriormente. Porém, a variação da proporção de fácies reservatório entre as duas malhas não é grande, chegando a uma variação média de apenas 7% (figura 5.7). Este fato ocorre porque em malhas com adensamento de poços, os canais maiores são rejeitados por não conseguirem honrar o condicionamento aos poços, gerando assim simulações com grande número de canais de pequeno porte.

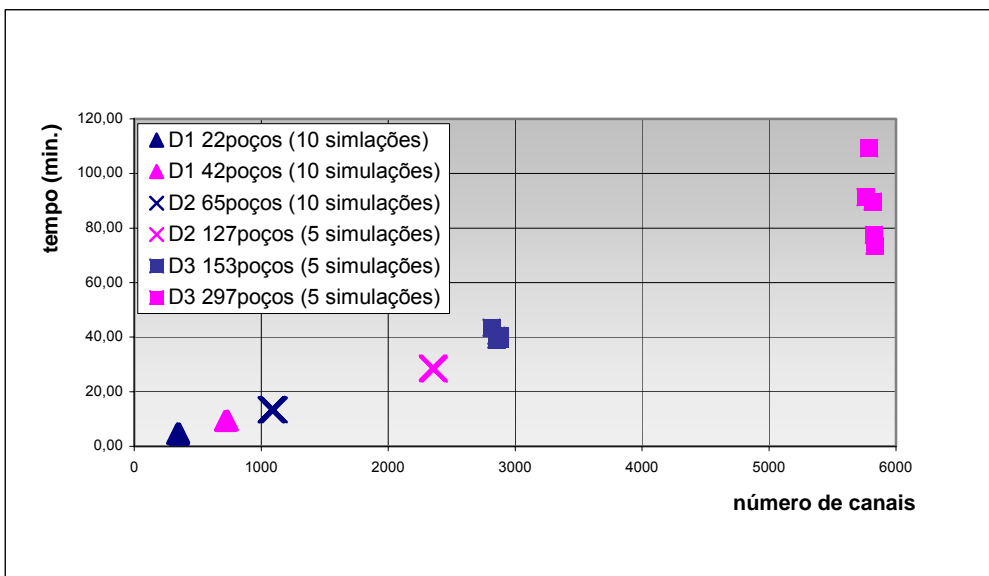


Figura 5.6 - Gráfico do “Tempo de simulação” vs “Número de canais gerados” para os seis grupos simulados.

Em malhas pouco adensadas, devido a maior facilidade no condicionamento aos poços, este problema não ocorre (figura 5.8). Pode-se afirmar assim que as simulações com um grande adensamento de poços não honram os histogramas de entrada. Este problema pode estar relacionado aos parâmetros de entrada, os quais, não representam a realidade do reservatório (parametrização inadequada), ou devido a representação equivocada das fácies reservatório e não-reservatório nos poços.

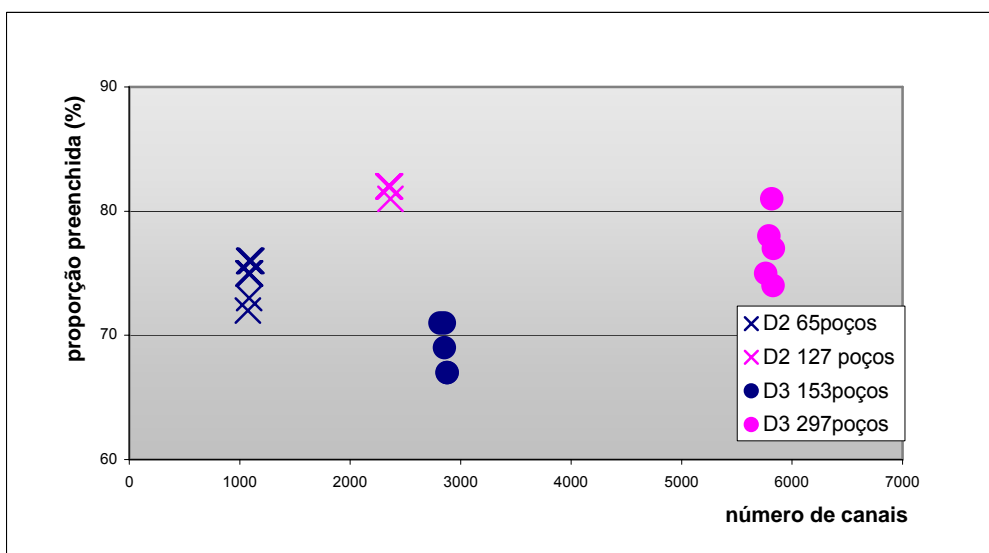


Figura 5.7 - Gráfico de “Proporção preenchida de fácies reservatório” vs “Número de canais gerados” para os quatro grupos com os maiores domínios.

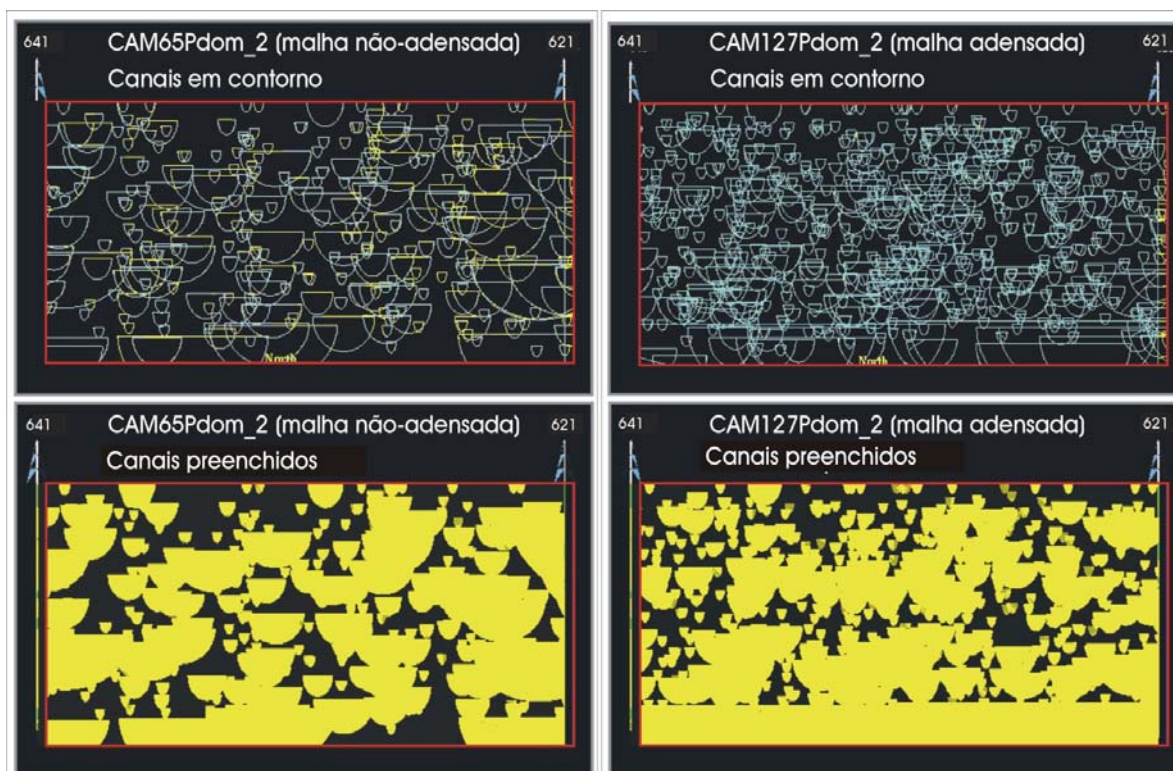


Figura 5.8 – Resultado de duas seções elaboradas para um mesmo domínio. A primeira seção com uma malha de poços não adensada (à esquerda) e a outra em malha adensada. As seções verticais foram obtidas no mesmo local e com o mesmo sentido (Leste-Oeste), posicionadas no centro do domínio. Observa-se uma maior concentração de canais na malha adensada em relação a não-adensada.

Considerando o grau de segurança elevado na determinação de rochas reservatório e não reservatório, com base nos perfis (*logs*) de poços, pode-se afirmar que, provavelmente, os parâmetros de entrada obtidos com base no modelo determinístico do reservatório não representam a realidade. Como o modelo foi construído com base em informações 1D de poços, os canais de maiores espessuras podem representar o empilhamento de sucessivos ciclos incompletos, como observado nos afloramentos.

Outro problema detectado nas simulações foi a deformação de meandros. Para melhor caracterização do problema foram gerados três projetos fictícios, onde todos apresentavam os mesmos parâmetros de entrada (largura 200m, espessura 10m, sinuosidade 1,5 e direção 90), porém com domínios distintos. Os domínios 1, 2 e 3 apresentam as seguintes dimensões, respectivamente, 2000 x 1500 x 100m, 1000 x 750 x 50 m e 500 x 375 x 25 m. As simulações foram condicionadas à curva de proporção global, de maneira que apenas um canal fosse gerado.

A partir da análise destes projetos, observaram-se variações no “comprimento do meandro” (este termo foi aqui definido como a distância entre dois meandros consecutivos, medidos a partir dos seus pontos de inflexões, na mesma margem do canal fluvial) em função do domínio simulado, gerando canais geometricamente distintos (figura 5.9). A tabela 5.2 apresenta os comprimentos dos meandros em função do domínio estabelecido para cada simulação.

Tabela 5.2 – Apresentação das dimensões de cada domínio simulado com seus respectivos comprimentos dos meandros gerados.

| Domínio | Dimensões do domínio | Comprimento do meandro |
|---------|----------------------|------------------------|
| 1 | 2000 x 1500 x 100m | 710m |
| 2 | 1000 x 750 x 50m | 355m |
| 3 | 500 x 375 x 25m | 177,5m |

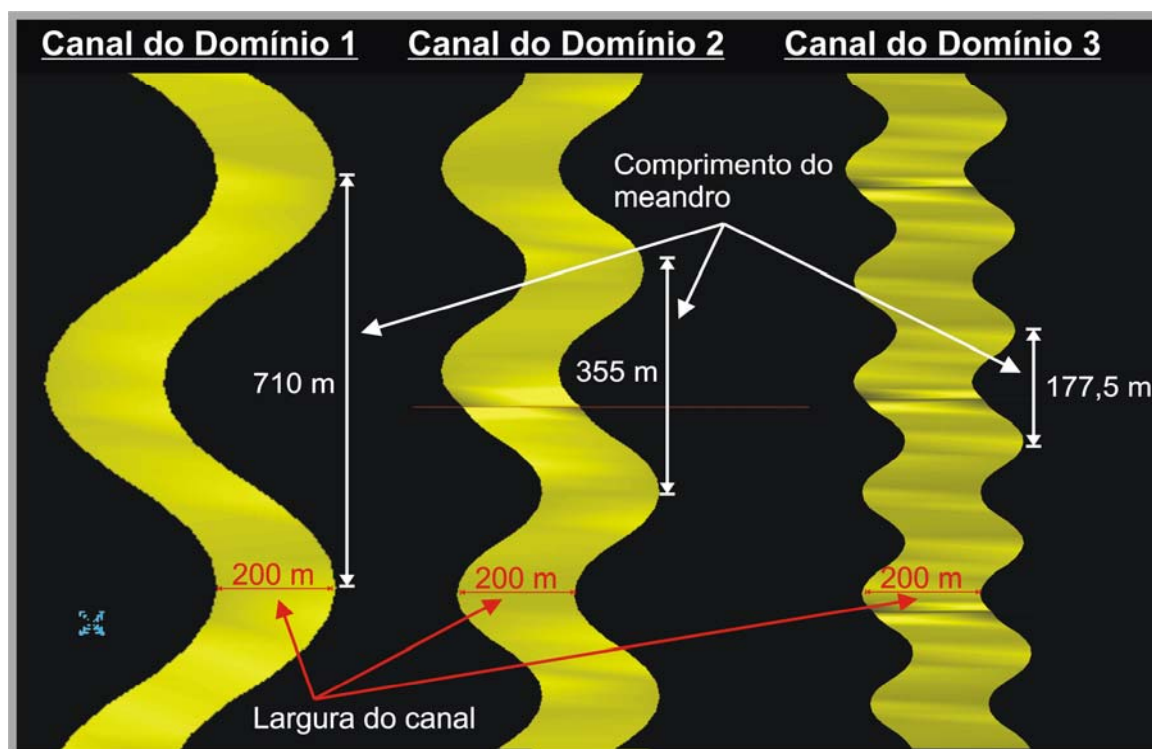


Figura 5.9 - Representação esquemática dos canais gerados em cada domínio, mostrando a variação no comprimento do meandro em função do domínio simulado.

Este problema ocorre devido à relação direta entre o domínio simulado e o comprimento do meandro. Pois, no programa Petbool, independentemente dos dados de entrada (largura, espessura, direção e sinuosidade), o canal fluvial é sempre gerado a partir de uma reta diretriz, que possui duas vezes o tamanho da diagonal do domínio simulado. Esta reta é segmentada em 15 partes e em cada segmento é atribuído um valor de sinuosidade que dará origem à curva geratriz.

Esta curva representa o eixo do canal e pode ser descrita como uma curva senoidal onde seu comprimento de onda é igual ao comprimento do meandro.

Para contornar o problema de mudança na geometria do canal, em função do tamanho do meandro, recomenda-se a criação do parâmetro **Tamanho do Meandro** na simulação com o objeto canal fluvial no programa PetBool. Seja na forma de histogramas, função ou valor constante, de forma que a reta geratriz seja segmentada em valores distintos, obtidos a partir do parâmetro **Tamanho do Meandro**.

A proposta metodológica desenvolvida neste trabalho abrange todas as etapas envolvidas na caracterização de análogos, antigos e recentes, aos reservatórios petrolíferos. Desde o reconhecimento regional, com seleção de área para montar o arcabouço geológico dos afloramentos análogos até o uso de técnicas e ferramentas para o mapeamento digital 3D dos afloramentos.

Na etapa de reconhecimento regional, a partir de trabalhos de campo e com base em produtos de sensores remotos (Landsat TM-7, STRM e fotografias aéreas convencionais) foi montado um mapa geológico de uma área com aproximadamente 964 km², na borda sul da Bacia Potiguar. Nesta etapa, foi também selecionada uma área para montar o arcabouço geológico dos depósitos fluviais da Formação Açú.

A arquitetura deposicional da Unidade Açú-3 foi obtida com base na técnica de Análises de Fácies com o auxílio de produtos de sensores remotos de alta resolução, integrados em um SIG. Nesta etapa, foi elaborado um modelo deposicional e paleogeográfico para a área que compreende um sistema fluvial meandrante de granulometria grossa com baixa sinuosidade. Foi possível também a individualização de 3 ciclos fluviais, predominantemente arenosos, com granodecrescência ascendente e separados por superfícies limitantes de 5^a ordem. Internamente a estes ciclos, foram caracterizados ciclos menores, normalmente incompletos, formados por corpos predominantemente arenosos, amalgamados, exibindo geometria de canal com alta razão largura/profundidade e limitados por superfícies de 4^a ordem.

Foram identificadas 07 fácies sedimentares. As lítofácies Fm e FI representam eventuais barreiras de fluxo de fluido e esta última foi aqui denominada de “folhelhos estocásticos”.

As medidas de paleocorrentes (no total de 326) obtidas nos 8 afloramentos apresentam o sentido predominante para NW. A distribuição das paleocorrentes para este sentido, posicionando ortogonalmente a Falha de Carnaubais sugere que os paleovales destes depósitos convergiam em direção ao rifte.

Dados adquiridos na etapa de arquitetura deposicional foram disponibilizados sob a forma de histogramas experimentais, que retratam os parâmetros: direção e espessura do canal.

No Mapeamento Digital do afloramento foram integrados dados sedimentológicos, levantamentos plani-altimétricos com Estação Total e GPS Geodésico, imageamento 3D com a técnica *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e

fotomosaicos digitais de alta resolução. Para integração, modelamento e visualização dos dados foi utilizado o programa GoCad®.

Com GPS Geodésico foram aplicados métodos de posicionamento estático para definição da ondulação geoidal e implantação de dois marcos de referência no afloramento. Foram também adquiridos dados plani-altimétricos do afloramento usando o método RTK (*Real Time Kinematic*).

O uso do *Laser Scanner* permitiu a geração de um modelo detalhado da escarpa do afloramento, representada por uma nuvem de pontos com 2.143.300 pontos adquiridos a partir de 11 cenas levantadas no afloramento. Todos os pontos foram georreferenciados com os marcos implantados no afloramento.

Nos perfis de reflexão adquiridos no afloramento não foram evidenciados refletores que subsidiassem interpretações geológicas de subsuperfície. A falta de refletores geológicos foi creditada à ausência ou pouco contraste das propriedades elétricas na interface dos corpos de arenitos presentes no afloramento.

A partir da interpretação e correlação dos dados dos dez perfis de reflexão, adquiridos no análogo recente, foi possível a individualização de sete corpos sedimentares principais. O topo dos perfis é caracterizado por um refletor horizontalizado, o qual foi interpretado como um depósito em lençol (*sand sheet*). Os demais corpos apresentam-se levemente inclinados ou côncavos para cima, interpretados como de canais amalgamados.

A geração de modelos mais regionalizados possibilitou a contextualização dos análogos modelados. Com integração dos dados plani-altimétricos obtidos com Estação Total, GPS e *Laser Scanner*, foi possível gerar o modelo digital do afloramento. Em virtude da ausência de dados de subsuperfície, o produto final do mapeamento digital do afloramento foi a construção de um Modelo Fotorealístico de parte da escarpa do afloramento.

No modelo construído no Rio Assu (análogo recente) obteve-se a distribuição de corpos sedimentares dentro de um domínio tridimensional, com base na geração de superfícies limítrofes dos corpos geológicos interpretados nos perfis de reflexão.

Nas simulações estocásticas com grande adensamento de poços, a rejeição de canais maiores foi relacionada a problemas nos parâmetros de entrada. Provavelmente, estes parâmetros não representam fidedignamente a realidade do reservatório.

A deformação dos meandros, em simulações com mesmos parâmetros de entrada e domínios distintos, foi atribuída à relação direta entre o domínio simulado e o comprimento do meandro. Para contornar o problema recomenda-se a criação

do parâmetro **Tamanho do Meandro** na simulação com o objeto canal fluvial no programa PetBool.

A metodologia apresentada nesta dissertação pode ser usada na indústria do petróleo como proposta metodológica para criação de banco virtual de afloramentos. Produtos de mapeamento digital estão disponíveis para implantação de viagens virtuais a afloramentos análogos aos reservatórios de petróleo, na criação de banco de dados de objetos geológicos parametrizados, para ensaios de fluxo de fluidos e ainda para subsidiar tomada de decisões gerenciais.

- ALLEN, J. R.L. 1983. Studies in fluvial sedimentation: a comparison of fining-upwards cyclothems. *J. Sediment. Petrology*, 40:298-323.
- ANNAN, A. P. 1992. Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors and Software, incorporated, Mississauga, Ontario, 150 pp.
- ARARIPE, P. T. & FEIJÓ, F., 1994. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*. v. 8, n. 1, p. 127-141.
- BARTON, M; ANGLE, E; YEH, J; CARRASCO, B.N. 1995. Characterization of heterogeneity style and permeability structure in fluvial reservoirs. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin. (Relatório Final, contrato número 6502032931). 42 p.
- BECKER, M.R.; CARRASCO, B.N. ; SOCORRO, M; & FARIAS, P.R.C. 1992. Estudos de afloramentos para modelagem geológica e geoestatística do reservatório fluvial da Formação Açu, Bacia Potiguar. In: SEMINÁRIO DE GEOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E RESERVATÓRIO, 5, Rio de Janeiro, 1992. Atas... Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX-CENPES.
- BECKER, MR. 1996. Sedimentologic architecture, permeability structure, and fractal characteristics of braided fluvial deposits, cretaceous Açu Formation, Potiguar Basin, NE Brazil. Dissertation of “doctor of philosophy”, The University of Texas at Austin.p.331.
- BECKER, M.R.1997. O reservatório exposto: comentários sobre o uso de afloramentos como modelos análogos a intervalos produtores de petróleo. In: Workshop Sobre Caract. e Engenharia De Reservatório, 2, Campinas: SP.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I. G.; MATOS, R. M. D., 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e “habitat” do petróleo na Bacia Potiguar. In: GABAGLIA, G. P. R., MILANI, E.J., (ed). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro : Petrobrás. P.291-310.
- BHATTACHARYA, J.P.; AIKEN, C.V., CORBEANU; R.M., McMECHAN, G.A.; XU, X.; ZENG, Z.; . WHITE, C.D. 2002. 3D Outcrop Reservoir Characterization. AAPG Annual Meeting. Março 2002, Houston, Texas. Disponível em: www.aapg.org/datasystems/abstract/13annual /SHORT/43604.pdf. Acesso em : 01 de fevereiro de 2003.
- BLITZKOW, D. NAVSTAR/GPS – Um desafio tornado realidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 3., São Paulo, 1995. Anais. São Paulo: EP/USP, 1995. p.429-462.

- BRIDGE, J. S.; ALEXANDER, J.; COLLIER, R. E. L.; GAWTHORPE, R. L.; JARVIS J. 1995. Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three dimensions: *Sedimentology*, v. 42, p. 839-852.
- BRIDGE, J. S.; COLLIER, R. E. L.; ALEXANDER, J. 1998. Large-scale structures of Calamus River deposits (Nebraska, U.S.A.) revealed using ground-penetrating radar: *Sedimentology*, v. 45, p. 977-986.
- BRISTOW, C. S., 1995, Internal geometry of ancient tidal bedforms revealed using ground penetrating radar. In.: B. W. Flemming and A. Bartholoma, eds., *Tidal signatures in modern and ancient sediments: International Association of Sedimentologists Special Publication 24*, p. 313-328.
- BROMLEY, M.H. 1991. Variations in fluvial style as revealed by architectural elements, Kayenta Formation, Mesa Creek, Colorado, USA: Evidence for both ephemeral and perennial fluvial processes. In: Miall, A.D. & Tyler, N. (Ed.) *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. Society for Sedimentary Geology. Tulsa, U.S.A. 3: 94 -102.
- BROWN, L.F.; CLEAVES, A.W.; ERXLEBEN, A.W. 1973. Pennsylvanian depositional systems in North-central Texas. *Bur. Econ. Geol. Guidebook*, 14:1-122.
- BROWN, D. 2001. Outcrops never looked so good. In. *AAPG Explorer*. vol. 22, Nº 4, abril 2001. p. 6, 8-10, 31.
- CASTRO, J. C. 1993. Facies, reservoirs and stratigraphic framework of the Mossoró Member (Latest Cenomanian-Earliest Turonian) in Potiguar Basin, NE Brazil: an example of a tide and wave dominated delta. In: RHODES, E. G. & MOSLOW, T. F. (eds.) *Frontiers in sedimentary geology - marine clastic reservoirs*. New York: Springer Verlag, 1993. p.161-182.
- CASTRO, J. C. & BARROCAS, S. L. S., 1981. Roteiro de campo: facies da Formação Açú, Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CEMPES. 30p. (Relatório Interno 673-2256).
- CORBEANU, R. M.; SOEGAARD, K.; SZERBIAK, R. B.; THURMOND, J.; MCMECHAN, B.; G. A.; WANG, D.; SNELGROVE, S.; FORSTER, C. B.; MENITOVE, A. 2001. 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. *AAPG Bulletin*, v. 85, no. 9, p. 1583-1608.

- CÓRDOBA V.C. 2001. A Evolução da Plataforma Carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: Análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Tese Doutorado, 239 p.
- COWAN, E.J. 1991. The large-scale architecture of the fluvial Westwater Canyon Member, Morrison Formation (Upper Jurassic), San Juan Basin, New Mexico. In: Miall, A.D. & Tyler, N. (Ed.) The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery. Society for sedimentary geology. Tulsa, U.S.A. 3: 80 - 93.
- CREMONINI, O. A.; GOULART, J. P. M.; SOARES, U. M., 1996. O Rife Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. In: UNEP, Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 4, Rio Claro, Boletim..., p. 89-93.
- DAVIS, J.L., ANNAN, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophys. Prospect. 37, 531–551.
- DREYER, T.; FÄLT, L.-M.; HOY, T.; KNARUD, R.; STEEL, R.; and CUEVAS, J. – L. 1993. Sedimentary architecture of field analogues for reservoir information (SAFARI): a case study of the fluvial Escanilla Formation, Spanish Pyrenees. In: The geological modeling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues. Spec. Publ. Int. Ass. Sedimentologists. Oxford, Great Britain. 15: 57 – 80.
- ESCHARD, R.; LEMOUZY, P.; BACCHIANA, C.; DÉSAUBLIAUX, G.; PARPANT, J.; SMART, B. 1998. Combining Sequence Stratigraphy, Geostatistical Simulations, and Production Data for Modeling a Fluvial Reservoir In: Chaunoy Field (Triassic, France). AAPG Bulletin, V.82, No. 4, p. 545-568.
- FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATMARI, P., 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. Revista Brasileira de Geociências, v. 17, n. 2, p. 196-207.
- GAUW, D.S. 2004. Análise morfodinâmica do canal fluvial e caracterização faciológica e geométrica dos depósitos recentes do Rio Assu. Relatório de graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. p.126.
- GAWTHORPE, R. L.; COLLIER, R. E. L.; ALEXANDER, J.; BRIDGE, J. S.; LEEDER, M. R. 1993. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies, in C. P. North and D. J. Prosser, eds., Characterization of fluvial and aeolian reservoirs: Geological Society Special Publication 73, p. 421-432.
- HACKSPACHER, P. C. & OLIVEIRA, D. C., 1984. A evolução estrutural das zonas de cisalhamento Portalegre e Santa Mónica – RN. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geología, 33, Rio de Janeiro, Anais..., v.6, p. 1679-1692.

- HACKSPACHER, P. C.; CORSINO, A.R.; SRIVASTAVA, N. K.; TIRIBA, V. F., 1985. A Falha de Afonso Bezerra como evidencia de significativo tectonismo frágil NW_SE, na Bacia Potiguar emersa – RN. Boletim UFRN/CCET/DG, v.10, p.33-44.
- JACKSON, R.G. II 1975. Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. Geol. Soc. Amer. Bull., 86:1523-1533.
- LANZARINI, W.L. 1995. Modelos e Simulações de Fácies e Seqüências Sedimentares Fluviais e Eólicas de Reservatórios Petrolíferos. São Paulo, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado em modelos deposicionais e geomatemáticos de sistemas fluviais e eólicos, 205p.
- LANZARINI, W. L.; POLETTO, C. A.; TAVARES, G.; LOPES, H.; PESCO, S. 1997. Stochastic modeling of geometric objects and reservoir heterogeneities. SPE 38953, V Lacpec CD_ROM, Rio de Janeiro, Brasil, 7p.
- LIMA FILHO, F. P., POLETTO, C. A., TAVARES, G., MENEZES, L., BEZERRA, F. H. R., REYES, Y. A., BARROS, D. N., FLORENCIO, C. P. 2002. Stochastic Modeling in 3D of Fluvial Channels Using of PetBool Software for the Viabilization of Special Oil Wells in an Environmentally Protected area in Northeastern Brazil In: 2 Meeting on Reservoir Simulation, 2002, Buenos Aires, ARGENTINA. (CD)
- MacDONALD, A. C. & HALLAND, E. K. 1993. Sedimentology and shale modeling of a sandstone rich fluvial reservoir: Upper Staffjord Formation, Staffjord Field, northern North Sea. AAPG Bulletin, Tulsa, v. 77, n. 6, p.1016 –1040.
- MacDONALD, A. C. 1999. The role of geology in stochastic heterogeneity modeling. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL GEOLOGY, Comission on Fossil Fuels / International Association for Mathematical Geology, 5, Trondheim, Norway, 6 – 11th August 1999. Proceedings...Trondheim, v. 2, 645
- MATOS, R. M. D., 1987. Sistemas de riftes cretáceos do Nordeste Brasileiro. In: Seminário de Tectônica da Petrobrás, 1, 1987, Rio de Janeiro. Atas..., Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX, P. 126-159.
- MATOS, R. M. D., 1992. The Northeast Brazilian Rift System. Tectonics, v.11, n.4, p.766-791.
- McMECHAN, G. A., GAYNOR, G. C., and SZERBIAK, R. B. 1997. Use of ground-penetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoir analogs: Geophysics, v. 62, p. 786-796.

- MENEZES, L & LIMA FILHO, F. P. 2001. Técnicas para parametrização de reservatórios utilizando afloramentos fluviais análogos: exemplo da Formação Açu, Bacia Potiguar. *Revista Técnica de Energia, Petróleo e Gás*, N° 0: 7–13.
- MENEZES, L. 2002. Caracterização Faciológica e Parametrização de Análogos a Reservatórios Petrolíferos Fluviais da Formação Açu (Unidade Açu-3) Bacia Potiguar. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Relatório de Graduação. Natal, RN.
- MIALL, A. D., 1977. A review of the braided-river depositional environment. *Earth Science Reviews* 13, 1-62.
- MIALL, A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In: MIALL, A.D. (ed.). *Fluvial Sedimentology*. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, p. 859. Memoir 5.
- MIALL, A.D. 1985. Architectural-Element Analysis: a New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth Science Reviews*, Amsterdam, v.22, p. 261 – 308.
- MIALL, A.D., 1988a. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstone lessons from outcrop studies. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Tulsa, v.72, n. 6, p.684-697.
- MIALL, A.D., 1988b. Architectural Elements and Bounding Surfaces in Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado. *Sedimentary Geology*, v. 55, p. 233 -262.
- MIALL, A. D. and N. Tyler 1991. The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implication for hydrocarbon discovery and recovery: *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, v. 3, 309 p.
- MIALL, A.D. 1996. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Italy, Springer Verlag, 1996, 582p.
- MIZUZAKI, A. M. P., 1987. A Formação Macau, Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, Relatório interno.
- MONT'ALVERNE, A. A. F.; JARDIM DE SÁ, E. F.; DERZE, G.R.; DANTAS, J. R. A.; VENTURA, P. E. O., 1998. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Natal, DNPM/UFRN/PETROBRÁS /CRM.
- MONTEIRO, M.C. & FARIA, R.T., 1990. Análise ambiental das plataformas carbonáticas Albo-Maastrichtianas da Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES/SUPEP/DIGER. Relatório interno. 82p.
- MORAIS NETO, J. M., 1999. As coberturas sedimentares terciárias do interior da Paraíba e Rio Grande do Norte e a gênese da Antéclise da Borborema.

- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 170 p.
- OLARIU, C.; XU, X.; GE, R.; Aiken, C.L.V.; Bhattacharya, J.P. 2002. Digital Mapping of Outcrops, Techniques for Building 3-D Delta Front Architecture. Example from the Cretaceous Panther Tongue Sandstone, East-Central Utah. AAPG Annual Meeting. Março 2002, Houston, Texas. Disponível em: www.aapg.org/datasystems/abstract/13annual /SHORT/43751.pdf. Acesso em : 01 de fevereiro de 2003.
- OLIVEIRA, D. C., 1993. O papel do Enxame de Diques Rio Ceará-Mirim na evolução tectônica do nordeste oriental (Brasil): implicações na formação do Rifte Potiguar. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 172 p.
- POLETO, C. A. 1996. Modelagem geológica orientada a objetos e simulação estocástica da geometria de reservatórios fluviais. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Dissertação de Mestrado, 141p.
- POLETO, C. A., MENEZES, L., LIMA FILHO, F. P., TAVARES, G., LOPES, H., PESCO, S. 2002. Fluvial Outcrops Parametrization Applied to Object Based Geological Modeling for reservoirs of the Potiguar Basin – Brazil. In.: TERRA NOSTRA. 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. Berlin, Alemanha. Setembro, 2002.
- PORSANI, J.L. 2002. Método GPR: Aplicações em Geologia, Geotecnia, Meio Ambiente e Planejamento Urbano. IV Escola de Verão de Geofísica. IAG/USP.
- PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R. 1995. O Método GPR Aplicado à Caracterização de Reservatórios: Um Exemplo no Afloramento Açú – Bacia Potiguar – RN. In: 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. 1º Conferência da União Latino-Americana de Geofísica. Agosto 1995. Rio de Janeiro, Brasil. P.843-845.
- REYES-PÉREZ, Y. A. 2003. Caracterização da geometria de depósitos sedimentares na borda sudoeste da bacia potiguar. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. P. 81.
- RICCOMINI, C; GIANNI, P.C.F; MANCINI, F. 2000. Rios e Processos Aluviais. In: TEIXEIRA, W; TOLEDO, M.C.M; FAIRCHILD, T.R; TAIOLI, F; (eds.) Decifrando A Terra. São Paulo: Oficina de Texto. p.192-214.
- RICHARDS, M. 1996. Fluvial systems. In: Emery, D. & Myers, K. (eds.). Sequence stratigraphy, Blackwell Science, p. 111-172.
- ROBINSON, S.D. e MICHAUD, Y. 1999. Geomorphologic applications of ground penetrating radar. In: A Handbook of Geophysical Techniques for Geomorphic

- and Environmental Research, R. Gilbert, compiler, Geological Survey of Canada Open File Report 3731, p. 69-102.
- RUBIN, D. M. 1987. Cross-bedding, bedforms, and paleocurrents: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Concepts In: Sedimentology and Paleontology, v. 1, p.187.
- RUST, B.R. 1978. a classification of alluvial channel systems. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir, 5, 187-198.
- SCHENK, C.J.; GAUTIER, G.R.; OLHOEFT, G.R. e LUCIUS, J.E. 1993. Internal Structure of an eolian dune using ground-penetrating radar. In: Special Publics Inte. Ass. Sediment. 16, 61-69.
- SCHUMM, S.A. 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentological implications. In: Ethridge F.G., Flores, R.M. (eds) Recent and ancient nonmarine depositional environment: models for exploration. Soc. Econ. Paleontol Mineral Spec. Publ 31:19-29
- SIMÃO, A.J. V. & CARVALHO, M. M. R. Aplicação de Modelos Digitais de Terreno ao Estudo Físico do Território. Disponível em: <<http://www.fatorgis.com.br/artigos/gis/mdt/mdt.htm>>. Acesso em: 22, janeiro, 2002.
- SMITH, D.G. AND SMITH, N.D., 1980, Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta: Journal of Sedimentary Petrology, 50:157-164.
- SOUZA, S.M., 1982. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador. Anais..., v. 5, p. 2392-2406.1.
- TEIXEIRA, A. L. A., CHRISTOFOLETTI, A. 1997. Sistemas de Informação Geográfica – Dicionário Ilustrado. Editora Hucitec. São Paulo, Brasil, 244p.
- TEIXEIRA, A. L. A., MORETTI, E., CHRISTOFOLETTI, A. 1992. Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica. Edição do Autor, Rio Claro, 80 p.
- TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, 1997a. Pro XR with Pathfinder Office - Surveying and Mapping Product Training. Sunnyvale, CA - U.S.A.
- TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, 1997b. Real Time Surveying - Classroom Manual - Surveying and Mapping Product Training. Sunnyvale, CA - U.S.A.
- VASCONCELOS, E.P., LIMA NETO, F. F., ROOS, S., 1990. Unidades de correlação da Formação Açú. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 36, 1990, Natal. Anais..., v.1, p. 227-240.
- WALKER, R.G. AND CANT, D.J. 1984. Sandy fluvial systems. In: R.G. Walker (ed.), Facies Models, 2 ed. Geoscience Canada Reprint Series, 1: 71-89.
- WALKER, R.G. 1984. Facies models. Toronto, G.A.C. 211p (Geoscience Canada, reprint series, 1).

XU, X.; AIKEN, C.L.V.; BHATTACHARYA, J.P. 2002. Photorealistic Virtual 3-D Geologic Outcrops with Examples in Texas, Utah, Arkansas and California: The Virtual Fieldtrip is Here. AAPG Annual Meeting. Março 2002, Houston, Texas. Disponível em: www.aapg.org/datasystems/abstract/13annual/SHORT/43795.pdf. Acesso em : 01 de fevereiro de 2003.

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](#)