

Levantamento sísmico de reflexão rasa: um estudo dos arenitos Vila Velha no estado do Paraná, Brasil

Shallow reflection seismic survey: a study of the Vila Velha sandstone in the state of Paraná, Brazil

JOSENILDA DO N. LONARDELLI*, AUGUSTINHO RIGOTI**,
SIDNEI P. ROSTIROLLA** & CIRO J. APPI***

* Pós-graduação em Geologia - UFPR

** Departamento de Geologia - UFPR

*** Petrobrás/DME

josenildalonardelli@gmail.com; arigoti@ufpr.br; rostirolla@ufpr.br; appi@cenpes.petrobras.com.br

Resumo

A técnica de sísmica de reflexão rasa é analisada enquanto aplicação no imageamento de potencial reservatório fraturado. Os métodos, procedimentos e equipamentos utilizados neste tipo de trabalho são descritos de forma crítica. O levantamento sísmico passou inicialmente pela aquisição de dados de refração e análise de ruído para prover informações da resposta sísmica da área. Assim, definiram-se os parâmetros a serem empregados na aquisição dos dados de sísmica de reflexão rasa, de alta resolução, que constitui o objeto principal da pesquisa. O processamento dos dados é feito de forma expedita, apenas para possibilitar a correlação com a geologia e validar a escolha dos parâmetros de aquisição. Os resultados sísmicos são correlacionados com os de poço e mapeamento. A sísmica de reflexão rasa é assim pioneiramente utilizada como ferramenta no imageamento de arenitos fraturados do Grupo Itararé, gerando imagens sísmicas que auxiliam no entendimento da geologia da área e subsidiam o estudo de modelagem de uma situação aflorante, análoga a potenciais reservatórios fraturados.

Palavras-chave: Sísmica de reflexão rasa, imageamento sísmico, modelagem de análogos, arenito fraturado, Grupo Itararé - Bacia do Paraná.

Abstract

Shallow depth reflection seismic is analyzed with respect to its applicability to imaging a fractured potential reservoir. Methods, procedures and equipment used in this type of survey are critically discussed. Initially, refraction and walkaway data were acquired to provide information on the seismic response of the study area and so determining the high resolution, shallow depth reflection seismic acquisition parameters, which constitutes the main target of the research. A quick data processing is carried out simply to allow for the correlation of the seismic data with geological information and to validate the choice of the acquisition parameters. Seismic results are correlated with borehole and surface geology data. The use of shallow depth reflection seismic is so applied for the first time to image the fractured sandstones of the Itararé Group, generating seismic images which contribute to the geological knowledge of the study area and give support to the study of outcrops which resemble fractured potential reservoirs.

Keywords: *Shallow reflection seismic, seismic imaging, analogue modeling, fractured sandstone, Itararé Group – Paraná Basin.*

Introdução e objetivos

A expressão *sísmica de reflexão de alta resolução* surgiu para diferenciar a sísmica de reflexão convencional utilizada para o petróleo, da sísmica utilizada para alvos mais rasos e menores, que por isso mesmo precisa ter uma maior resolução. Neste estudo, a sísmica rasa, de alta resolução, visa auxiliar no imageamento dos primeiros 100m de profundidade. Em profundidades de quilômetros como é comum investigar com a sísmica de petróleo não se tem resolução para detalhes da geometria de situações geológicas. A sísmica rasa está buscando subsidiar a exploração de petróleo. A modelagem de análogos é uma alternativa, detalhando situações aflorantes ou subaflorantes. O fraturamento, embora entendido como característica importante do reservatório, em geral recebe pequena importância justamente por falta de conhecimento até mesmo de como ocorre em profundidade. Assim, como o mapeamento geológico-estrutural no estudo de análogos é feito com resolução métrica ou até decimétrica, a geofísica também deve buscar a melhor resolução possível. Com isto em mente, vem-se testando os métodos sísmicos no alvo dos Arenitos Vila Velha. A área de estudo envolve a região de Rivadávia, localizada nas proximidades do Parque Estadual de Vila Velha na BR-376 que liga Curitiba a Ponta Grossa (fig. 1). O presente trabalho tem foco na determinação dos melhores parâmetros de levantamento e numa primeira análise das respostas geofísicas obtidas.

Enquanto na investigação profunda de petróleo a sísmica de reflexão detecta grande número de refletores, na sísmica rasa este número pode ser muito menor, considerando-se que a faixa de profundidade investigada é de apenas uma centena de metros e freqüentemente o interesse de investigação não passa de poucas dezenas de metros. A grande espessura de sedimentos de diferentes unidades estratigráficas cruzada pela sísmica convencional torna altamente provável a freqüente variação de impedância acústica que causa reflexões detectáveis. Além disto, a amostragem feita na sísmica convencional, o grande número de canais ativos, grupos de geofones para compor cada traço e minimizar o efeito do “*ground roll*”, e ainda fontes de alta energia (explosivo) ou então repetitivas (vibratórias) contribuem para que a sísmica convencional tenha mais recursos de salientar as reflexões de interesse. Contrariamente, a sísmica rasa se defronta freqüentemente com contrastes de impedância fracos e recursos limitados para salientá-los, com reflexões próximas à zona de ocorrência da refração e de sua reverberação (*ringing*).

A sísmica de reflexão rasa requer cuidados muito especiais na seleção do equipamento, da fonte, dos parâmetros de aquisição e no processamento dos dados. Sem o devido cuidado, é muito fácil que o trabalho de campo seja pouco aproveitável ou que resultados espúrios de processamento sejam tomados como refletores reais.

Estratigrafia da área

As rochas do Grupo Itararé são o foco desse estudo. Atenção especial é dada à Formação Campo Mourão, representada por uma porção sedimentar arenosa, também conhecida como Arenitos Vila Velha (França *et al.* 1996).

O Grupo Itararé apresenta alguns níveis estratigráficos onde predominam arenitos com bom potencial para reservatórios. Estas rochas reservatório arenosas são muito compactas e pouco porosas nos níveis silicificados próximos à superfície (Rostirolla *et al.* 2000).

Através de estudos realizados na Bacia do Paraná (e.g. França e Potter, 1988), o Grupo Itararé foi reconhecido como o melhor reservatório para hidrocarbonetos por apresentar algumas características peculiares, como:

- ✓ Estar em contato direto com os folhelhos da Formação Ponta Grossa (considerada como geradora do sistema petrolífero);
- ✓ Conter corpos maciços de arenito com boas qualidades de reservatório;
- ✓ Possuir rochas potencialmente capeadoras representadas por lamitos seixosos, siltitos e corpos de diabásio;
- ✓ Principalmente por ter mostrado os melhores indícios de hidrocarbonetos. Cita-se como exemplo a descoberta do campo de gás de Bonito no Paraná.

França e Potter (1988) consideram o Grupo Itararé como uma unidade glaciogênica com cerca de 1200 metros de espessura, que compreende as Formações Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana (fig. 2).

De idade carbonífera, a Formação Lagoa Azul representa o ciclo basal do Grupo Itararé, tendo composição basal arenosa e na superior o predomínio de diamictitos.

O ciclo médio do Grupo Itararé, designado Formação Campo Mourão, trata-se de uma unidade predominantemente arenosa, mas também com ocorrências de diamictitos, folhelhos e siltitos, estando presente em praticamente toda a bacia.

A Formação Taciba possui idade eopermiana e distribuição ampla na bacia. É composta por um membro basal arenoso (Rio Segredo, menos espesso em direção ao sul da bacia), constituído por arenitos e siltitos e alguns conglomerados. No membro superior (Chapéu do Sol), há franco predomínio de diamictitos.

França *et al.* (1996) acreditam que os Arenitos Vila Velha, aflorantes no Parque Estadual de Vila Velha, região próxima à área de estudo, são representados por arenitos sobrepostos a ritmitos e diamictitos na forma de platôs subhorizontais. Estes autores interpretam que tanto estes arenitos quanto os Arenitos Lapa são componentes de uma mesma seqüência deposicional, com os Arenitos Lapa representando os canais e os Arenitos Vila Velha sendo lobos subaquosos, depositados num ambiente induzido glacialmente.

Mais recentemente, Rostirolla *et al.* (2000) individualizam quatro subunidades faciológicas da Formação Campo Mourão, denominadas informalmente de subunidades Icm1 a Icm4 (fig. 3), além de afloramentos da Formação Ponta Grossa e rampas de colúvio nas áreas mais baixas.

Segundo estes autores, a subunidade Icm1 compreende folhelhos e siltitos cinza-escuros, com intercalações de camadas de arenito muito fino. A subunidade Icm2, imediatamente sobreposta a Icm1, é constituída de arenitos finos a médios, maciços, com estruturas de fluidização, configurando fácies de lobos de suspensão e barras de desembocadura depositados por desaceleração de fluxo respectivamente.

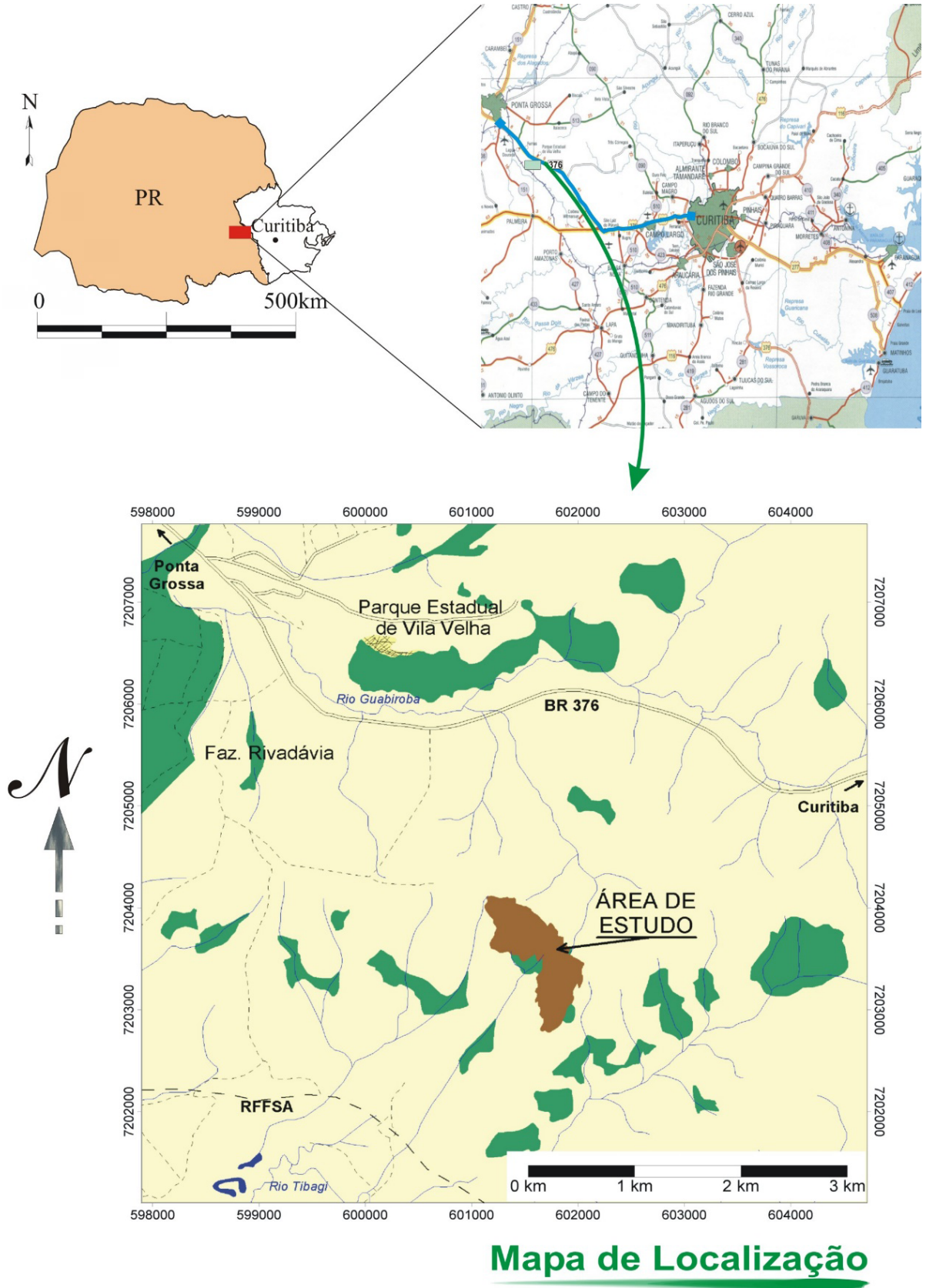


Figura 1 – Localização da área de estudo.
Figure 1 – Study of area location.

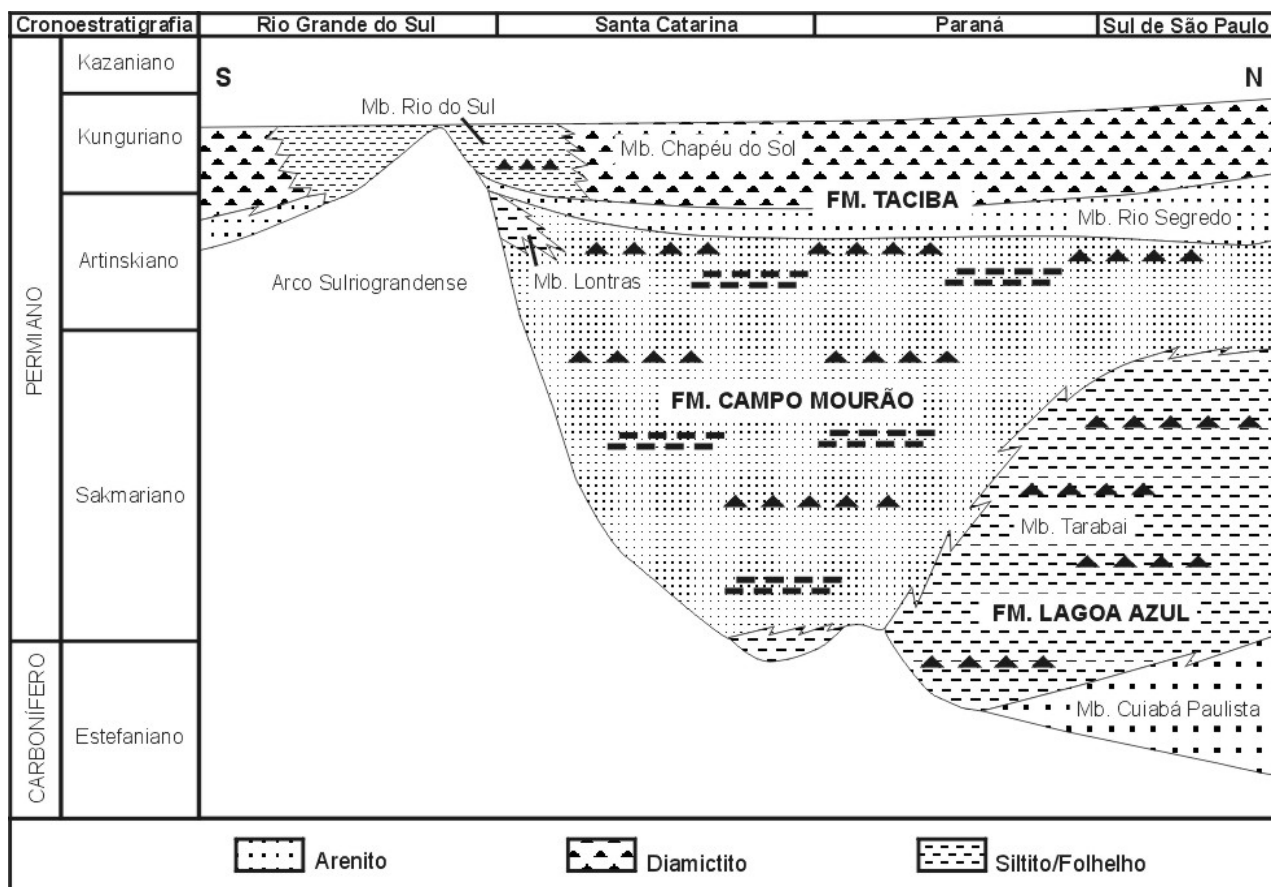


Figura 2 – Coluna estratigráfica do Grupo Itararé segundo França e Potter, 1988.
Figure 2 – Stratigraphic column of the Itararé Group according to França and Potter, 1988.

A subunidade Icm3 compõe-se de lobos arenosos maciços amalgamados, com forma lenticular acunhada; sua interpretação é semelhante à subunidade Icm2, porém com maior densidade de fluxo e tendência a processos trativos mistos com desaceleração de fluxo. Na parte superior desta subunidade, tem-se gradação para arenitos grossos a conglomerados.

A subunidade Icm4 contém camadas contorcidas, depositadas em discordância sobre a unidade Icm3, em contexto de fluxos gravitacionais. Ocorrem níveis com feições de deslizamento e, sobre esses, arenitos grossos a médios, com estratificação plano-paralela ou em cunha. A parte superior da subunidade Icm4 contém algumas camadas de barras sigmoidais, rítmicas, gradacionais na base e topo, tendendo a gradação inversa, marcando um novo ciclo apenas parcialmente preservado da erosão atual.

Padrão estrutural da área

A área de estudo localiza-se a sul de um mosaico de grandes falhas regionais, na confluência entre dois corredores de deformação NW e NE. Sistemas de falhas retilíneas na direção NW e anastomosadas na direção NE compõem o arcabouço estrutural da área, em conjunto com segmentos menores segundo NS e EW. As falhas NE são igualmente reconhecidas na área de estudo, porém são menos contínuas, provavelmente por serem anteriores aos lineamentos NW (Appi e Rostirolla, 2004).

Segundo Rostirolla *et al.* (2001) e Trzaskos-Lipski *et al.* (2003), os principais elementos estruturais descritos na área compreendem sistemas de juntas e pequenas zonas de cisalhamento marcadas como ressaltos no relevo.

Fotointerpretação e levantamento de detalhe na área permitiram reconhecer duas famílias de fraturas, de direção N10E e N70W, ambas subverticais, com a direção N10E ocorrendo com maior frequência. A distribuição final configura um sistema de pequenos *grabens* e *horsts*, limitados por falhas com pequeno rejeito, da ordem de dezenas de centímetros a, localmente, poucos metros. O movimento ao longo destas falhas é quase imperceptível, localmente evidenciado por lineações e assimilado em bandas de deformação, onde ocorre uma cimentação característica por óxidos de ferro e/ou sílica nos planos (Rostirolla *et al.*, 2000).

Quanto à disposição das camadas, Rostirolla *et al.* (2000) em levantamento estrutural de detalhe realizado na área, descrevem-nas como subhorizontais, com leves basculamentos gerados por rotação a partir das falhas maiores.

Instrumentação

O sistema de aquisição utilizado é composto por três unidades Geode (24 canais cada – figura 4) de fabricação Geometrics, controlado pelo sistema MGOS (também Geometrics) via um computador especialmente desenhado para condições de campo. Possui “*dynamic range*” de

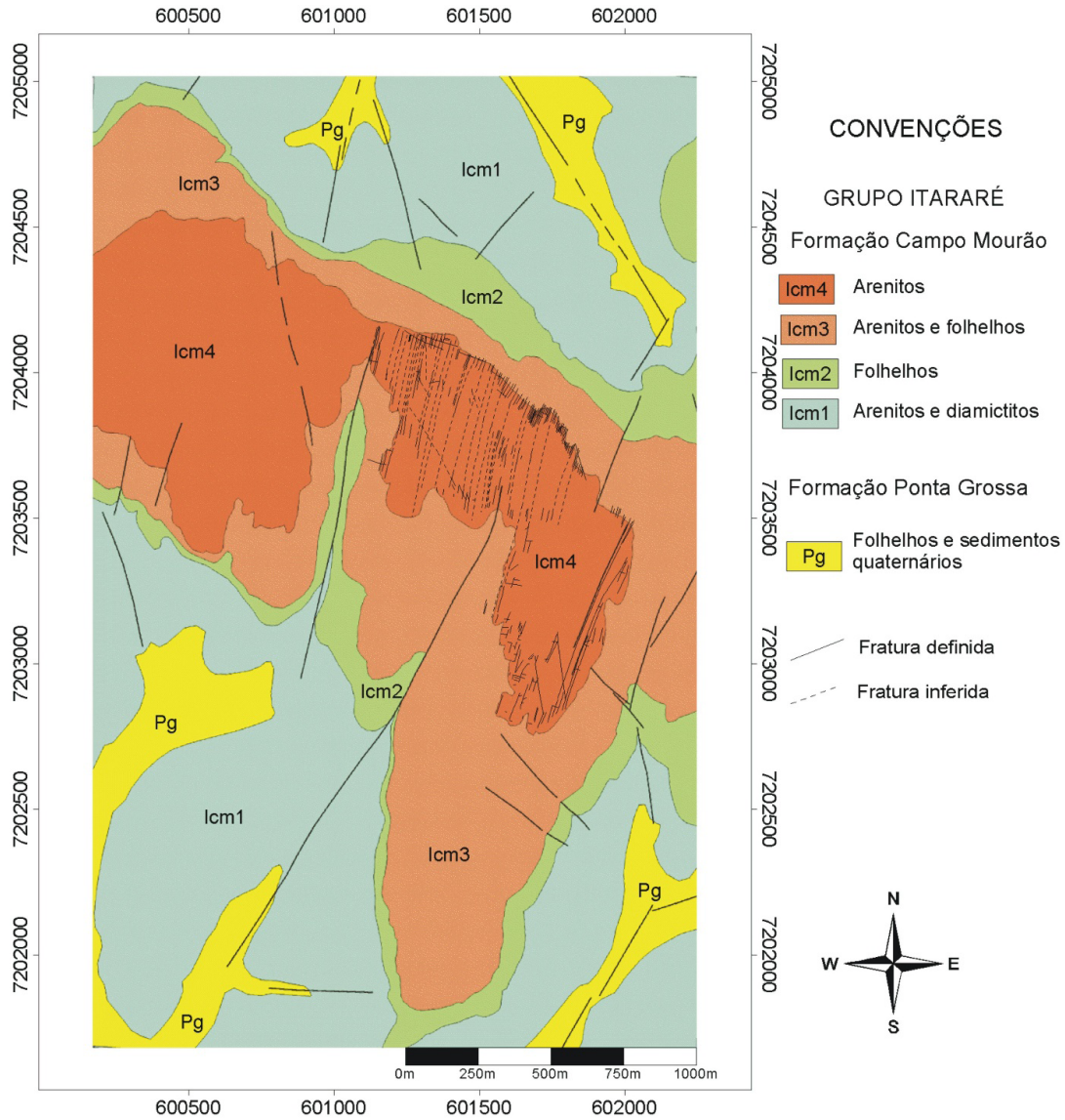


Figura 3 – Mapa geológico de detalhe, mostrando a distribuição das unidades mapeadas. A área de estudo limita-se a área onde estão traçadas as fraturas. (modificado de Rostirolla *et al.*, 2000).

Figure 3 – Geological map detail, showing the distribution mapped units. The study area is limited by fractures tracing area (modified from Rostirolla *et al.*, 2000).

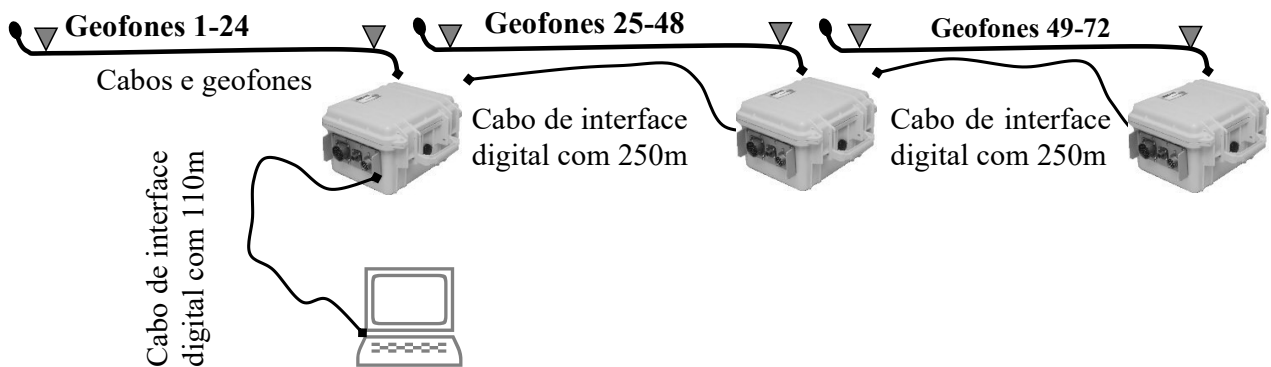


Figura 4 – Sistema de aquisição com 72 canais em 3 módulos (Geodes) de 24 canais cada, usando o laptop com o software MGOS para controle do registro dos dados.

Figure 4 – Acquisition System of 72 channels in 3 modules (Geodes) of 24 channels each, using a laptop with software MGOS for control data recording.

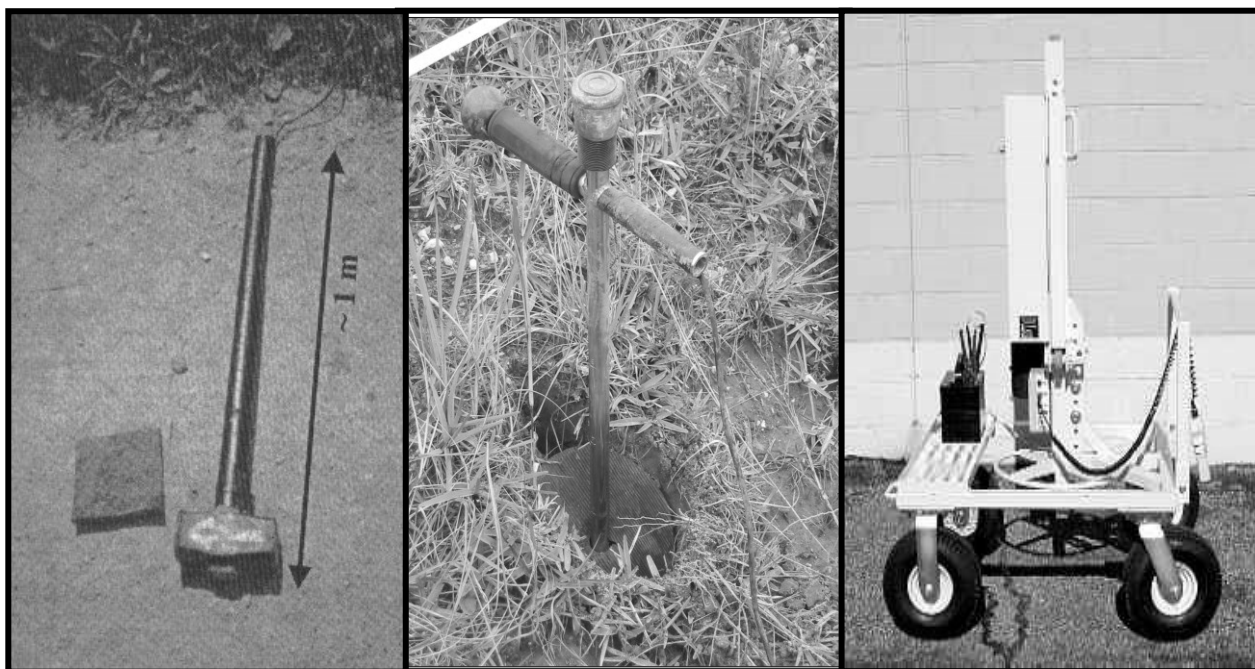


Figura 5 – Rifle sísmico enterrado a uma profundidade de 50cm, preparado para detonação. Com apenas um pequeno toque na sua porção superior (cor branca) ele detona.

Figure 5 – Betsy gun grounded into 50cm depth, ready for detonation. With only a small touch on its upper portion (white color) it detonates.

144dB, “bandwidth” que vai de 1.75Hz a 20kHz e conversão analógico-digital (A/D) de 24bits.

Os geofones utilizados têm frequência fundamental de 14Hz com resposta plana acima desta frequência. O equipamento de registro (Geode) foi adequadamente selecionado porque é modular (ver figura 4), expansível para um milhar de canais. Mas o levantamento deste trabalho foi realizado com apenas 72 canais, sendo 48 destes ativos, o que caracteriza ainda uma limitação para levantamentos sísmicos de reflexão de alta resolução.

Um levantamento cuidadoso inicia-se com a instalação dos geofones, procurando limpar a zona de raízes, retirando o solo pouco compacto e procurando o melhor acoplamento possível. Contudo, na Rivadávia, as condições de afloramento rochoso são tais que em certos locais não se tem o mínimo de solo para fixar os geofones. Prado (2000) sugere o uso de argila de modelar na fixação dos geofones nestas condições, porém com alguma perda do conteúdo espectral de alta frequência. Outra possibilidade que foi testada e aprovada é o uso do martelo perfurador rompedor, para fazer os furos diretamente na rocha para acoplamento dos geofones e para detonação da fonte sísmica.

A fonte sísmica utilizada foi o rifle sísmico (*Betsy Gun*) calibre 12 (fig. 5). Uma alternativa similar seria a queda de peso acelerada, mas estudos comparativos demonstram que em termos de energia elas são muito semelhantes. Se por um lado a queda de peso possibilita somar impactos, por outro ela é pouco prática se o acesso não for muito fácil.

O aprofundamento do tiro do rifle a uma profundidade mínima de 30 ou 40cm é importante não só para que a energia se propague de forma eficiente para o subsolo

como também para minimizar o efeito da onda aérea. Outros procedimentos assumidos envolvem o furo de trado exatamente no diâmetro do dispositivo de disparo do cartucho e preenchimento do mesmo com água para melhor propagação da energia para o interior da terra.

Levantamento sísmico de reflexão rasa

A sísmica de reflexão é empregada na exploração de petróleo desde os anos 60 (Dobrin, 1976) e a partir dos anos 80 vem sendo aplicada também nas áreas de engenharia, água subterrânea e meio ambiente. Nestes casos, o objetivo é de investigar profundidades mais rasas que 100m e que exigem maior resolução na definição de seus alvos, então a denominação sísmica de reflexão de alta resolução ou sísmica rasa (Knapp e Steeples, 1986a e 1986b; Steeples e Miller, 1990).

A sísmica de reflexão utiliza o estudo dos tempos de percurso e variações de amplitude das ondas elásticas P ou S refletidas em interfaces geológicas no lapso de tempo compreendido entre sua geração e seu registro nos receptores. Sua aplicação visa a determinação da estrutura das camadas geológico-geotécnicas e o conhecimento das propriedades físicas dos materiais que as constituem.

Aquisição dos dados

Testes iniciais para auxiliar na determinação dos parâmetros de aquisição envolveram ensaios de sísmica de refração e teste de ruído (*Pseudo-Walkaway noise test*). Estes testes são muito importantes no início dos levantamentos com reflexão rasa, pois permitem definir os parâmetros mais adequados para o local, como o espaçamento entre geofones, *near e far offsets* e visualizar as interferências que ocorrerão no sismograma.

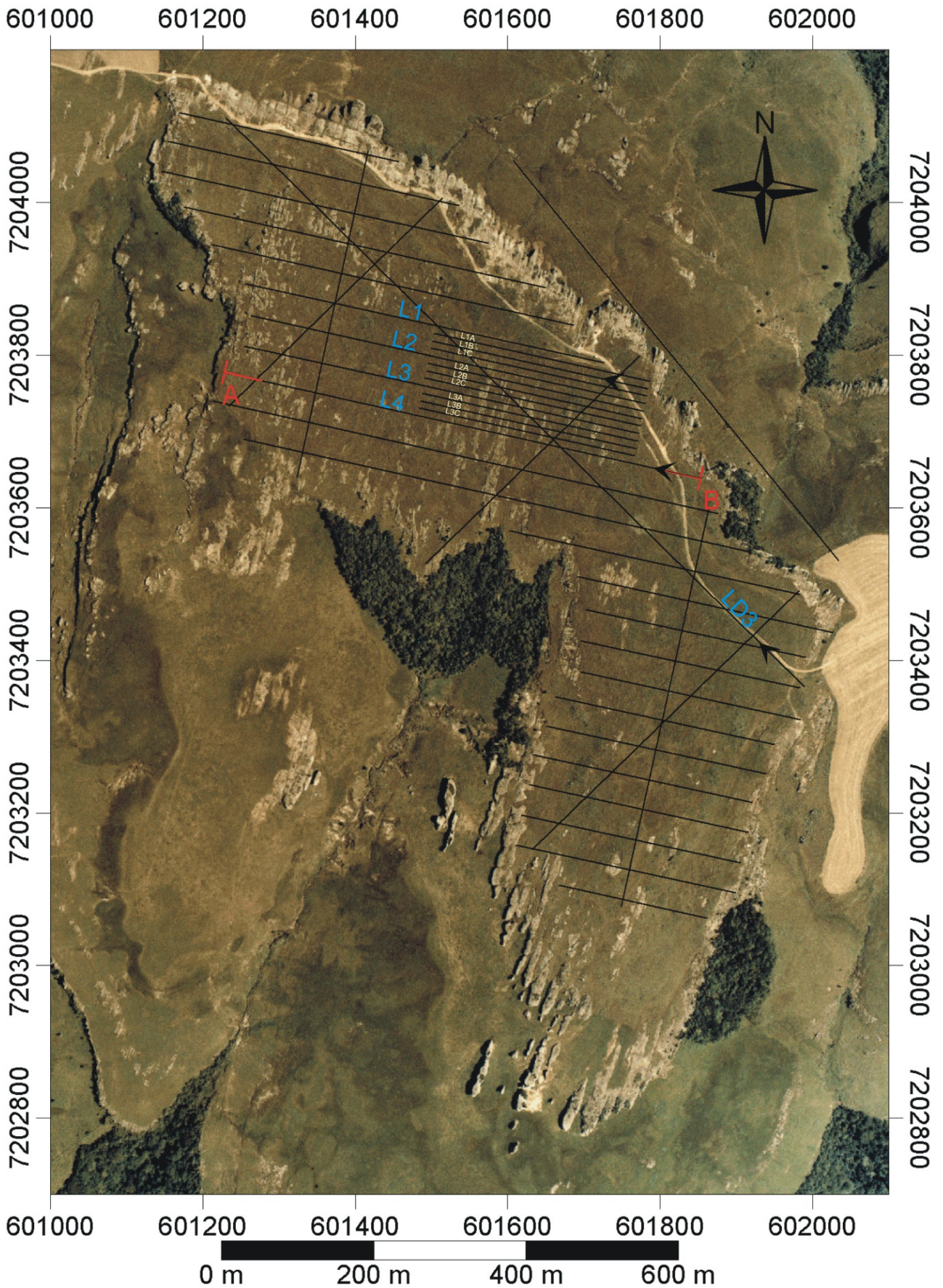


Figura 6 – Localização das linhas onde se realizaram os levantamentos sísmicos, na Fazenda Rivadávia.
Figure 6 – Lines location where seismic surveys were done in Rivadávia Farm.

Ensaio de Refração

A técnica de refração associada à reflexão rasa visa fornecer informações sobre a velocidade e espessura das primeiras camadas, que auxiliam na interpretação da reflexão. A interpretação dos dados de refração é feita com base nas curvas “tempo x distância”, construídas a partir dos tempos de primeiras chegadas das ondas P.

Na refração, há a necessidade de pelo menos um tiro em cada extremidade da base sísmica, para que seja possível a determinação de eventual mergulho de camadas e para determinação da velocidade real e não apenas da aparente.

A profundidade de investigação alcançada vai depender do tamanho da base sísmica. Quanto maior a base sísmica maior a profundidade investigada; grosso modo, a profundidade que se atinge com a refração é 1/3 do tamanho da base sísmica. Como não se optou por explosivo como fonte por várias razões, mas principalmente a ambiental, a profundidade de investigação na refração foi limitada à que a marreta de 8,5kg e a energia do rifle sísmico calibre 12 possibilitam.

O ensaio de refração foi realizado ao longo da linha L1 (fig. 6), utilizando-se um sismógrafo Geode com 24 geofones espaçados de 2m e a marreta de 8,5kg como fonte. A figura 6 apresenta a localização das linhas onde se realizaram os levantamentos sísmicos e as flechas indicam o sentido do desenvolvimento do arranjo de geofones.

A análise de ruído também foi realizada sobre a linha L1. Nas linhas L1A e L3A foram realizados testes de reflexão, sendo a extensão linear de cobertura sísmica de aproximadamente 200m para cada linha.

A sísmica de refração com tiros nas extremidades da base, a 1m dos geofones 1 e 24, detecta apenas duas camadas. A distância crítica nesta situação é de 8m. Com os tiros afastados 8m dos geofones 1 e 24, como esperado, detecta-se apenas a segunda camada. Um quinto tiro foi posicionado entre os geofones 12 e 13.

Os resultados da refração são mostrados no gráfico “tempo x distância” (fig. 7) e nas seções sísmicas de variação contínua (fig. 8a) e com duas camadas (fig. 8b). Esta última é assumida como modelo para a porção mais rasa (≈20m) da área.

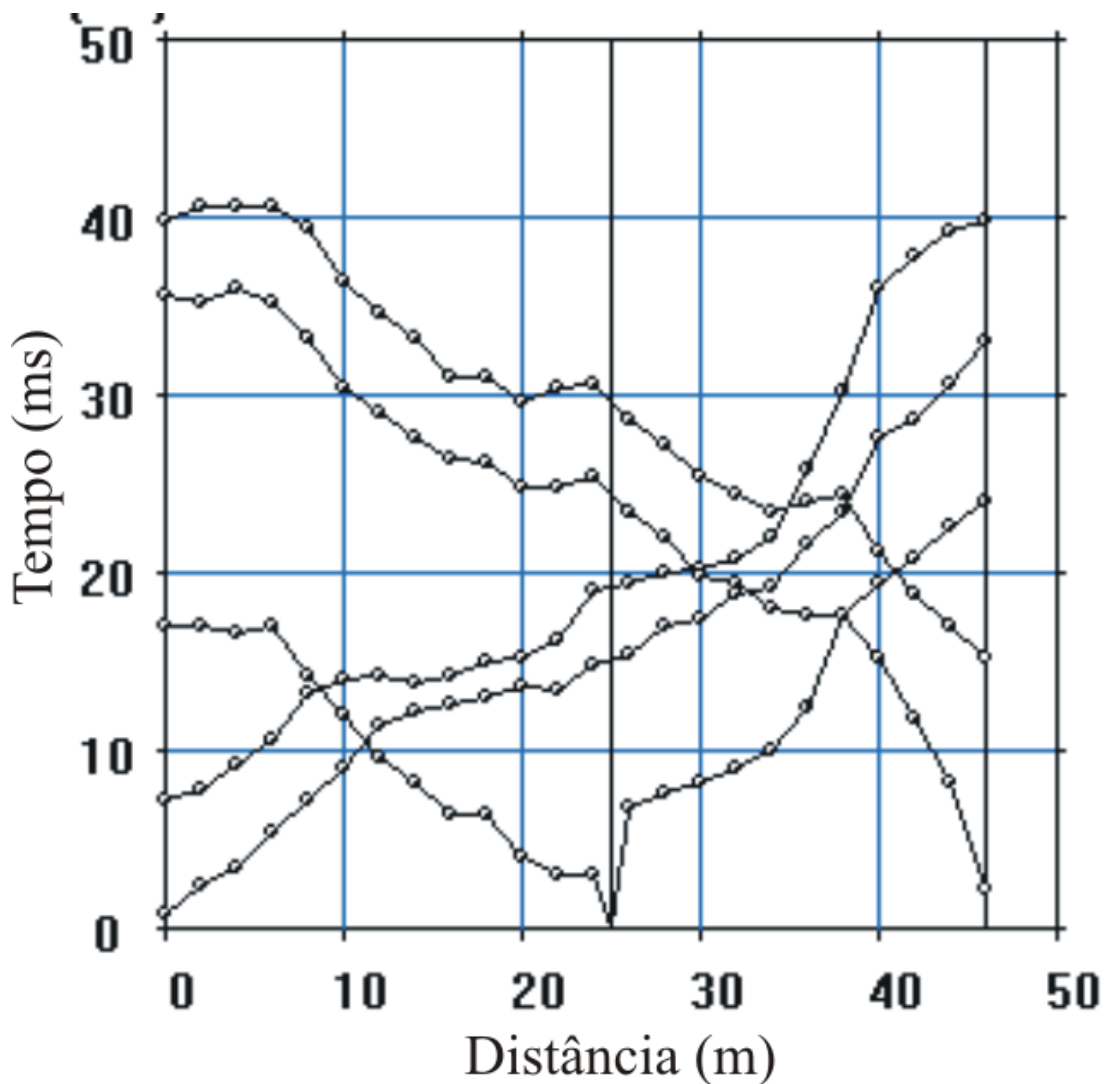


Figura 7 – Curvas “tempo x distância” na L1. As linhas retas relacionam-se a V1 e V2.
Figure 7 – “Time x distance” curves on L1. The straight lines relate to V1 and V2.

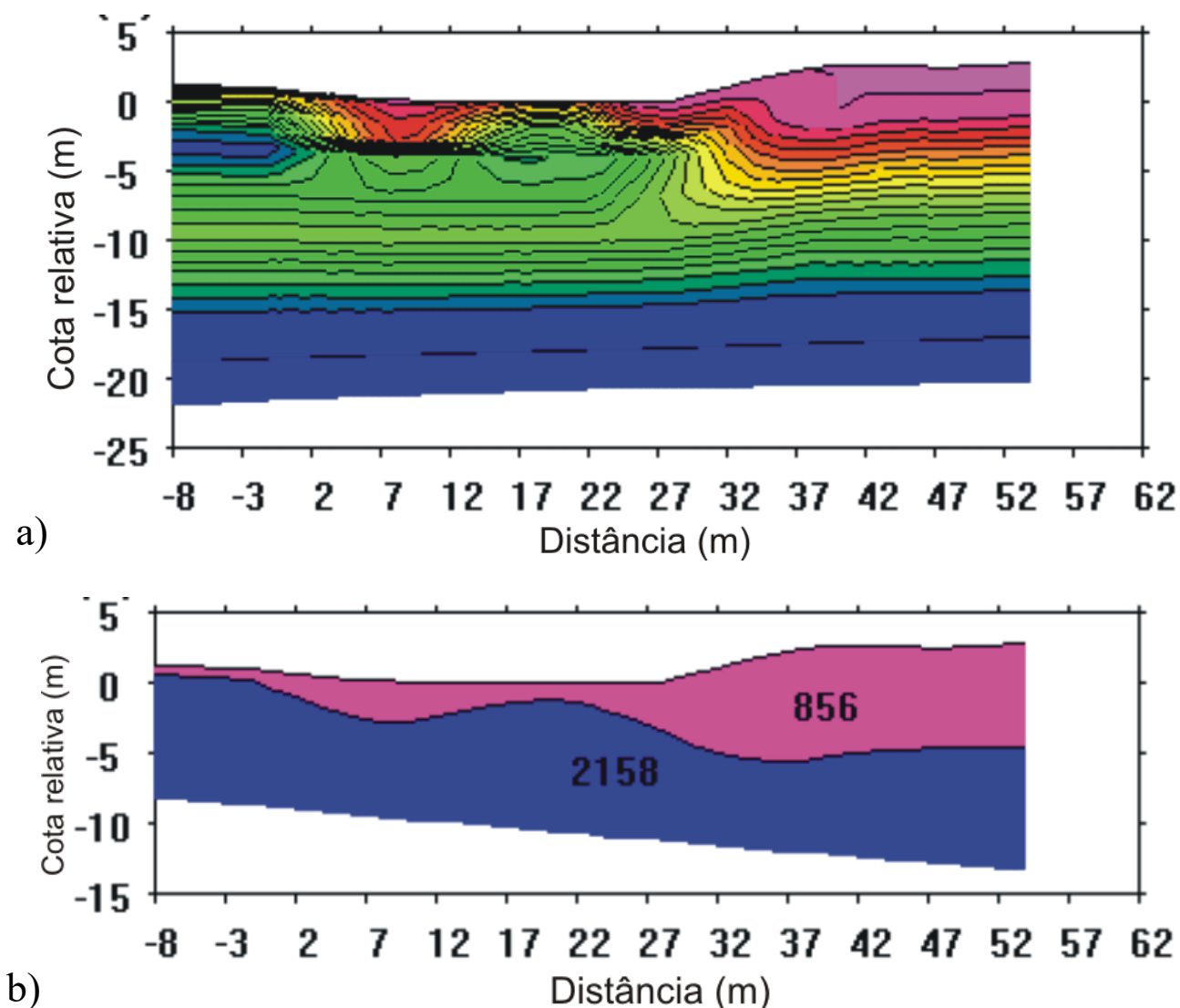


Figura 8 – a) Modelo geológico inicial apresentando uma distribuição contínua de velocidade; b) Modelo geológico final de 2 camadas ($V_1=856\text{m/s}$; $V_2=2158\text{m/s}$).

Figure 8 – a) Initial geological model illustrating a continuous velocity distribution; b) Final geological model of 2 layers ($V_1=856\text{m/s}$; $V_2=2158\text{m/s}$).

A primeira camada (superior) pouco espessa, com a profundidade variando entre 2m e 6m e com velocidade da ordem de 800m/s correlaciona-se à camada de solo compacto e/ou regolito. A segunda camada, já mais espessa, chega a uma profundidade mínima de 15m. Apresenta velocidade em torno de 2000m/s, que é correlacionada à camada de arenitos da Formação Campo Mourão - Grupo Itararé.

Análise de ruído com *Pseudo-Walkaway*

O ensaio de análise de ruído (*Noise Test*) foi primeiramente realizado, no intuito de prover mais informações da resposta sísmica da área.

A fonte sísmica utilizada foi o rifle sísmico calibre 12 (*Betsy downhole percussion firing rod*) e para registro foram utilizados 3 sismógrafos Geode™ interligados e estes ligados ao laptop para controle e armazenamento dos dados.

Os principais parâmetros que precisam ser definidos no desenho da aquisição sísmica consistem em: comprimento de registro (*record length*), intervalo de amostragem (*sample interval*), afastamento mínimo (*near offset*) e máximo (*far offset*) entre fonte e geofones.

Como era a primeira vez que se realizava este tipo de levantamento na área, ele foi feito com um intervalo de amostragem exageradamente pequeno, para registrar o máximo de eventos possíveis de ocorrerem. Por isto o espaçamento entre geofones foi de 1m, com 72 geofones em linha. Este espaçamento é sugerido como 1/100 da profundidade que se deseja investigar.

O teste teve dois tiros. Um primeiro foi posicionado a 1m do arranjo de geofones e o segundo a 70m do arranjo que permaneceu fixo. Por isto mesmo o *walkaway* é dito "pseudo". Para cada posição de tiro é adquirido um registro e posteriormente os dois registros compõem uma

única seqüência como se tivesse sido dado um tiro com o dobro de geofones (144) em linha.

O procedimento de ensaios iniciais possibilitou visualizar as interferências entre os vários eventos sísmicos que precisam ser levados em consideração quando da aquisição, processamento e interpretação.

Apesar do ruído causado pelo vento constante durante o teste, o sismograma é bem típico de um *walkaway* (fig. 9). Só que na faixa de maior interesse, até cerca de 100ms não se observa com clareza nenhum refletor. Isto contudo não significa que não existam refletores, mas que estes não são evidentes à primeira vista.

Ensaio de Reflexão

O procedimento adotado para o desenho do arranjo para a sísmica de reflexão com a técnica CMP segue Knapp & Steeples (1986b).

Com os dados adquiridos através do *Pseudo-Walkaway*, foi possível determinar que o comprimento de registro (RL) de 300ms é adequado, que o intervalo de amostragem (SI) deveria estar em torno de 0.250ms, que o espaçamento entre geofones, calculado a partir da frequência dominante seria de 4m.

Os geofones foram então espaçados de 2m e não a 4m como determinado, para aumentar o detalhe o quanto possível. Iniciou-se o registro com primeiro tiro dado a

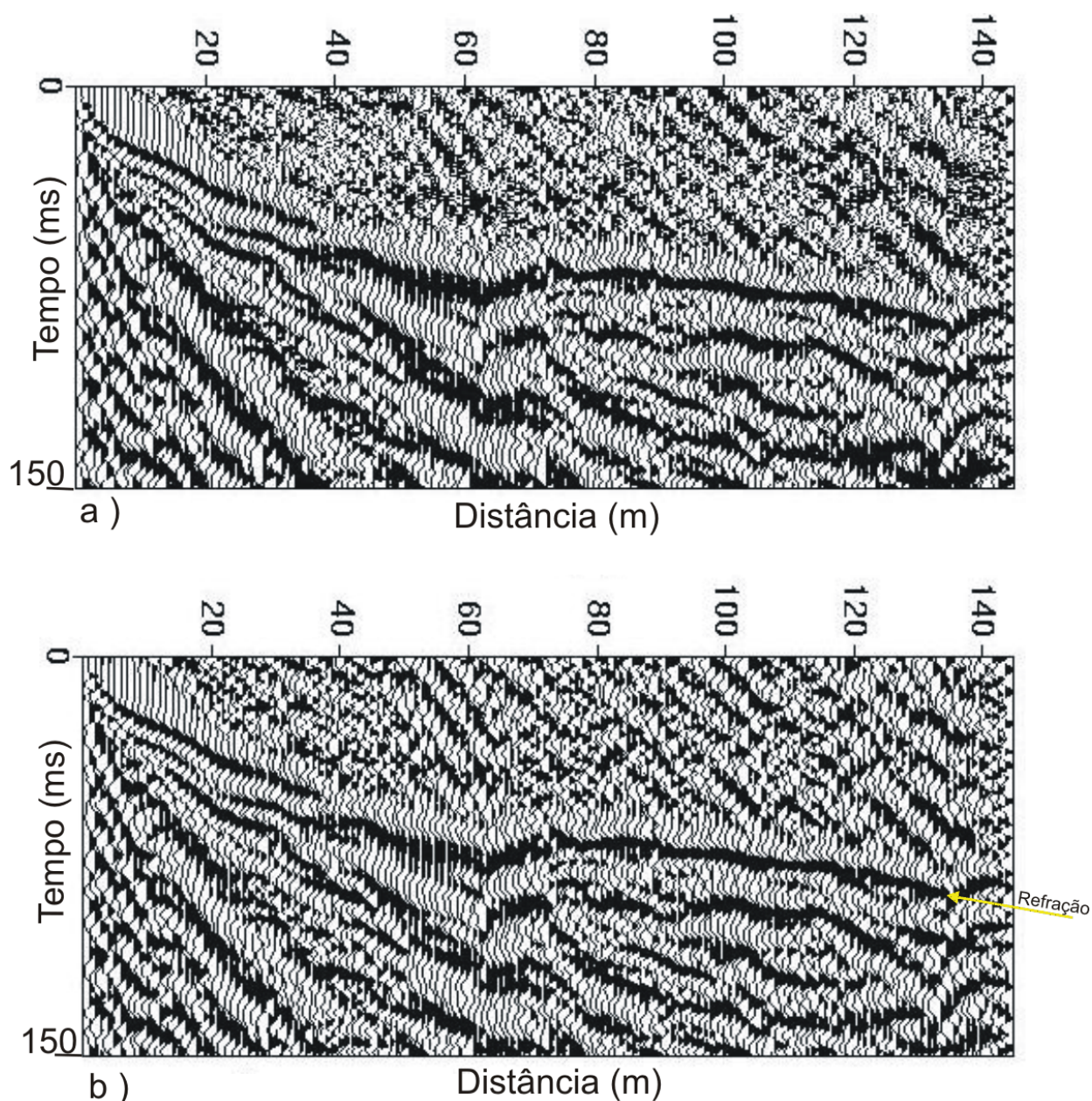


Figura 9 – Pseudo-Walkaway Noise Test realizado na Fazenda Rivadávia - L1; a) com aplicação de filtro AGC (janela de 50ms); b) AGC mais um filtro passabanda (10-40-200-400 Hz).

Figure 9 – Pseudo-Walkaway Noise Test performed in Rivadávia Farm - L1; a) with AGC filter (50ms window) applied; b) AGC and bandpass filters (10-40-200-400 Hz) applied.

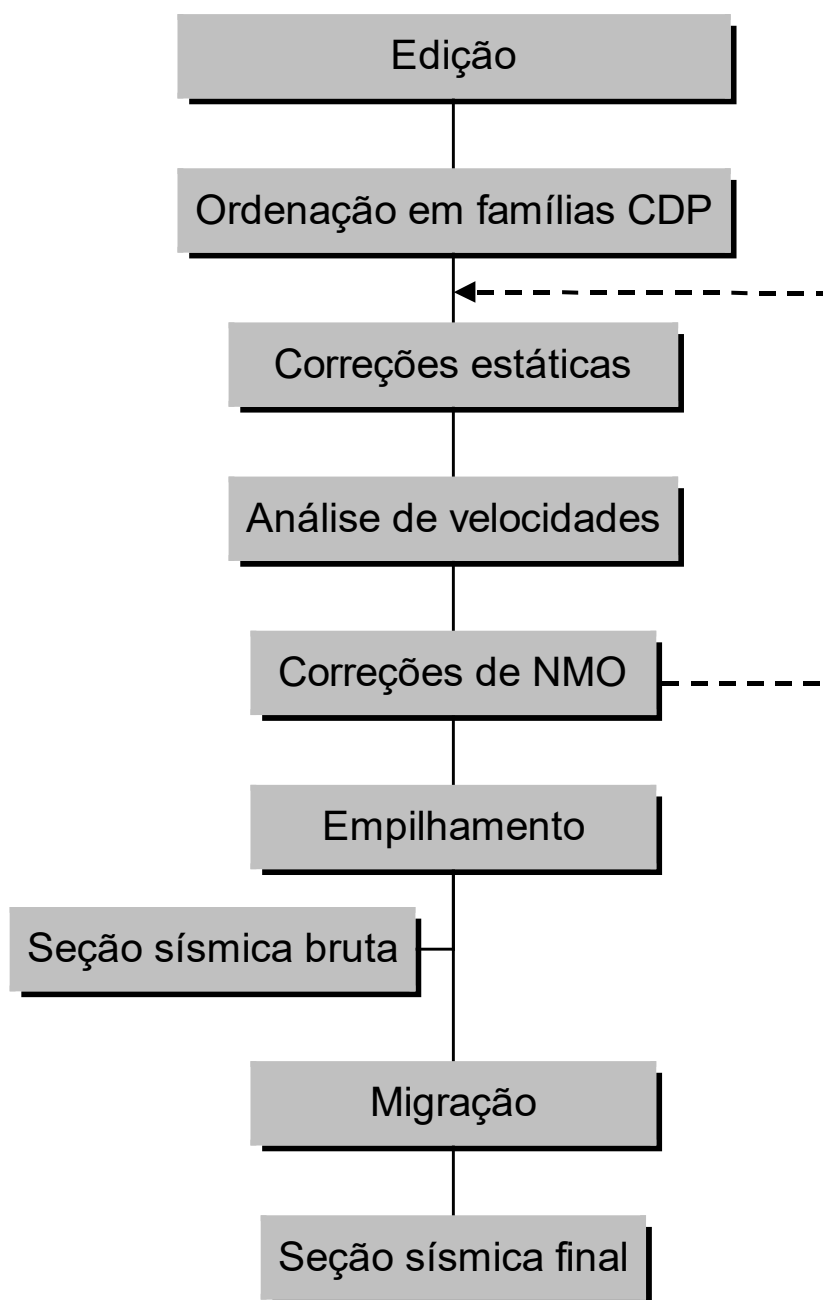


Figura 10 – Fluxograma básico apresentando a seqüência do processamento dos dados sísmicos de reflexão.
Figure 10 – Basic flowchart showing the reflection seismic data processing sequence.

6m do geofone 1, que a esta distância é possível escapar um pouco do efeito do *ground roll*, e na seqüência a cada 2m, até coincidir com a posição de cada geofone, obtendo assim um registro para cada posição.

Este procedimento foi realizado para o levantamento das linhas L1A e L2A, tendo como fonte sísmica o rifle sísmico calibre 12.

Por praticidade e por recomendação da literatura recente desta área, a técnica escolhida foi a CMP (*Common Mid Point*) com dispositivo de registro tipo *End-On Roll Along*. No lanço foram utilizados 72 geofones espaçados 2m, sendo 48 destes ativos. Assim, progrediu-se com os tiros até liberar um geode completo com 24 geofones, que era então movido para frente do lanço.

Processamento dos dados

O objetivo do processamento CMP é salientar as reflexões com prejuízo, eventualmente, de outros aspectos. Além dos procedimentos de correção estática e dinâmica (NMO), há uma série de outros que possibilitam melhorar a visualização e a qualidade das reflexões presentes em uma seção sísmica, como por exemplo, filtragens e migrações. Um fluxograma básico de processamento é apresentado na figura 10.

Para processamento dos dados de reflexão CMP foi utilizado principalmente o software ProMAX da Landmark Graphics Corporation. Os principais passos para realizar o processamento dos dados basearam-se em Ylmaz (2001).

A conversão e edição dos dados é o primeiro passo no processamento, convertendo o dado para o formato do software a ser usado no processamento e removendo intervalos “mortos” ou demasiadamente ruidosos. O passo seguinte consiste na confirmação de que cada traço sísmico digital tem a localização horizontal e vertical e distância entre tiro e geofone corretamente definidas no cabeçalho (*header*).

O *header* permite as correções de elevação e o sequenciamento (*sorting*) apropriado dos dados, podendo estes então ser organizados, agrupados em famílias CMPs. Uma família (ou conjunto de traços) CMP é uma coleção de todos os traços sísmicos que, de forma simplista, pode-se dizer que tem um ponto comum de reflexão em subsuperfície.

Refletores reais, num conjunto CMP, plotados com os traços na ordem crescente ou decrescente de distância a partir do ponto de tiro, têm uma curvatura hiperbólica. O grau de curvatura da hipérbole é determinado pela velocidade sísmica média acima do refletor, profundidade até o refletor, e distâncias desde o ponto de tiro até os geofones. É também dependente do mergulho do refletor e inclinação ou gradiente topográfico da superfície.

Traço a traço, deve ser feito um translado/migração no tempo (*time shift*) em função da profundidade e da distância, para corrigir o efeito de incidências não verticais dos raios sísmicos, antes de somar (empilhar) as famílias CMPs.

O passo seguinte consiste em determinar a velocidade sísmica nas diferentes camadas. O procedimento mais simples, com dados bons (isto é, reflexões evidentes) é ajustar uma hipérbole aos dados através da técnica de mínimos quadrados. Uma alternativa consiste em executar o NMO com uma série de velocidades. A velocidade que melhor horizontalizar o refletor representa a melhor velocidade NMO para aquele específico CMP à quele “*two-way reflection travelttime*” particular. Uma extensão desta técnica é feita através do *stacking* (empilhamento). A análise de velocidade foi bastante criteriosa e exaustiva, levando-se em consideração também as velocidades obtidas por meio do perfil sônico.

Em relação à filtragem, uma das mais importantes e relativamente simples é o AGC (*automatic gain control*) que pode ser do tipo automático ou instantâneo. Estes dois tipos diferem na forma em que o ganho é calculado dentro de uma janela de dados e na maneira como a janela se desloca ao longo dos traços. Tendo em mente a importância do tamanho da janela, foram testadas diversas janelas AGC, e o melhor resultado foi obtido com 50 a 80ms.

Estudo experimental semelhante fez-se também para a filtragem passabanda, notando-se que os lados do filtro não podem ser muito íngremes, ficando a melhor opção em torno da geometria cujos valores são 60-80-150-300Hz.

A filtragem FK, também se mostrou eficaz na atenuação de eventos inclinados (no domínio do tempo) indesejados que estavam mascarando as possíveis reflexões que tendem a ser mais horizontais. Na verdade, nenhum tipo de filtragem deve ser descartado antes de ser testado, pois pode funcionar muito bem em determinado dado e em outro nem tanto.

O próximo passo foi fazer o empilhamento, que resulta nas seções sísmicas, que são apresentadas na seqüência.

O processamento de forma geral tem como objetivo primordial determinar uma função velocidade que melhor represente o dado, de forma a gerar uma imagem que, após o empilhamento e migração, simule quanto possível a de subsuperfície. Os outros processos são formas de melhorar e/ou limpar o dado para que diminua a incerteza durante a análise de velocidade.

Integração dos dados

Os trabalhos de interpretação e de caracterização exigem, em várias escalas, a integração de múltiplos tipos de dados, freqüentemente, muito caros, como por exemplo a perfilagem de poço e que, para uma boa amarração do dado sísmico, são extremamente necessários. Neste trabalho contou-se com perfil litológico (fig. 11) e dados de perfilagem de um poço (perfis de raios gama - GR, resistividade, sônico, porosidade – figura 12) para correlacionar aos dados sísmicos e integrar o conjunto.

Por meio do perfil sônico de poço, foram calculadas as variações de velocidade que foram utilizadas para estimar o contraste de impedância acústica existente na área que, por sua vez, gerou a expectativa de reflexões. As velocidades encontradas foram de, aproximadamente, 1600m/s para a camada superficial, logo abaixo de pequena espessura de solo (800m/s) e 2600m/s para a maior parte da seção de interesse. Velocidades superiores a esta são observadas, tanto no perfil sônico como na análise de velocidade, para profundidades maiores.

Observa-se ainda no perfil sônico que a velocidade do arenito é bem superior à do folhelho. Uma das causas pode estar relacionada ao processo de silicificação a que o arenito foi submetido e que aumentou sua densidade. Esse fato vem contribuir para se ter boa resposta sísmica, visto que aumentando a densidade da rocha também aumenta a impedância acústica. No imageamento de formações arenosas tem-se a baixa impedância acústica como um agravante, pois a alta porosidade causa baixa densidade.

Tomando por base esses contrastes de velocidade, é de se esperar que haja um refletor marcando as interfaces onde eles ocorrem. Entretanto, as camadas são pouco espessas, não atingindo mesmo 5m em algumas porções.

Por meio do perfil de GR é possível observar a intercalação de níveis argilosos de espessura variada em meio à camada arenosa. Essa intercalação também está bem visível no perfil de resistividade, bem como no sônico e no de porosidade, o que dá mais consistência ao dado. À profundidade de 50 a 90m essa intercalação é bem marcada por pacotes espessos; apresenta níveis com espessura de aproximadamente 10m, os quais são bem resolvidos com a resolução vertical de 5m, que está sendo alcançada.

A descrição dos testemunhos do poço e a perfilagem, fornecem informações sobre a variação litológica em paralelo à variação de velocidade, que auxiliam no processamento dos dados, principalmente na análise de velocidade.

Uma boa correlação desses dados, rocha-perfil-sísmica, aliada ao conhecimento prévio da geologia da área, reduz sobremaneira a margem de erro na interpretação. Na figura 13 apresenta-se um exemplo de correlação possível com os dados disponíveis no presente trabalho.

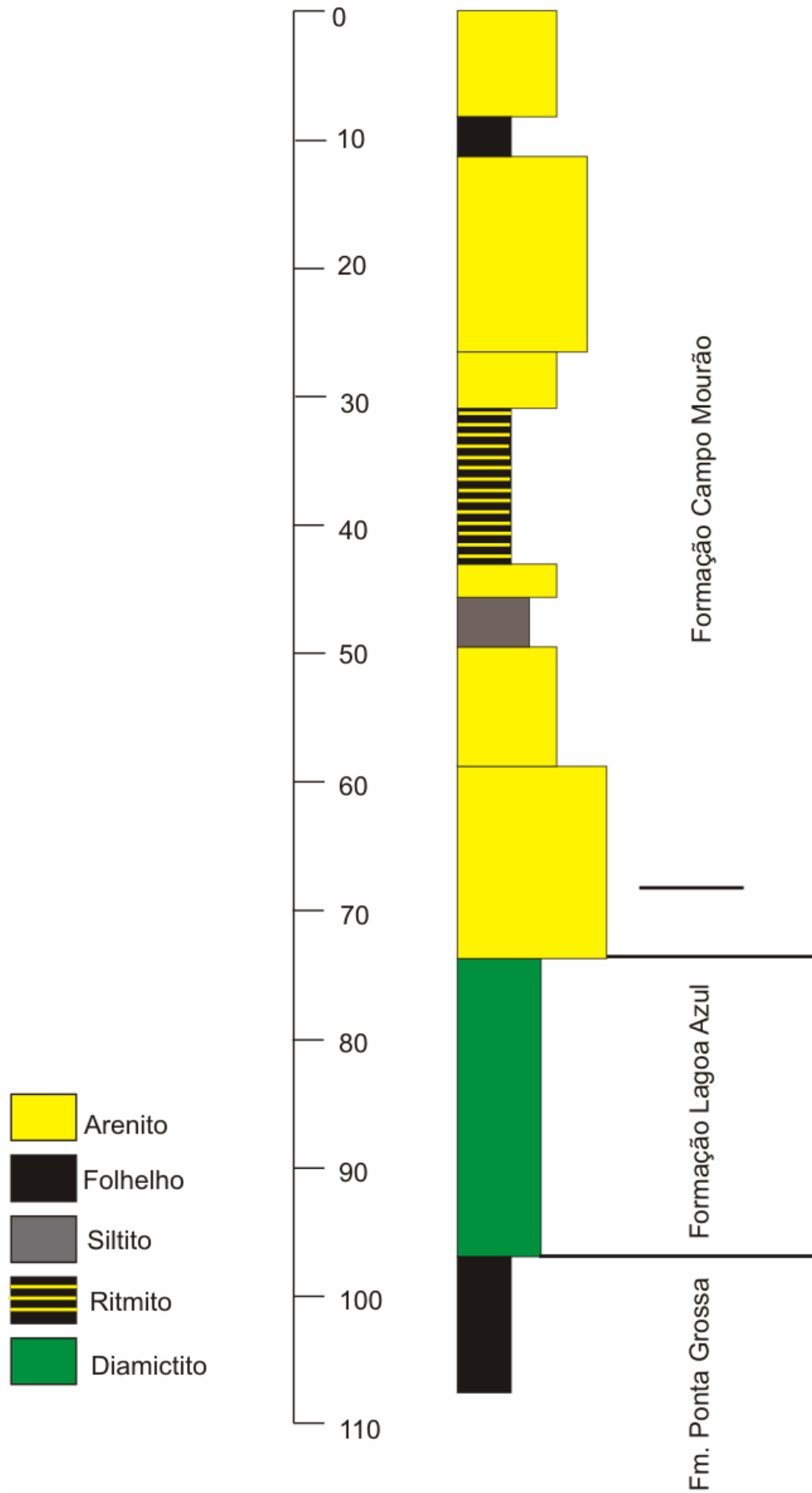


Figura 11 – Perfil litológico da área Rivadavia.
Figure 11 – Lithological profile of the Rivadavia area.

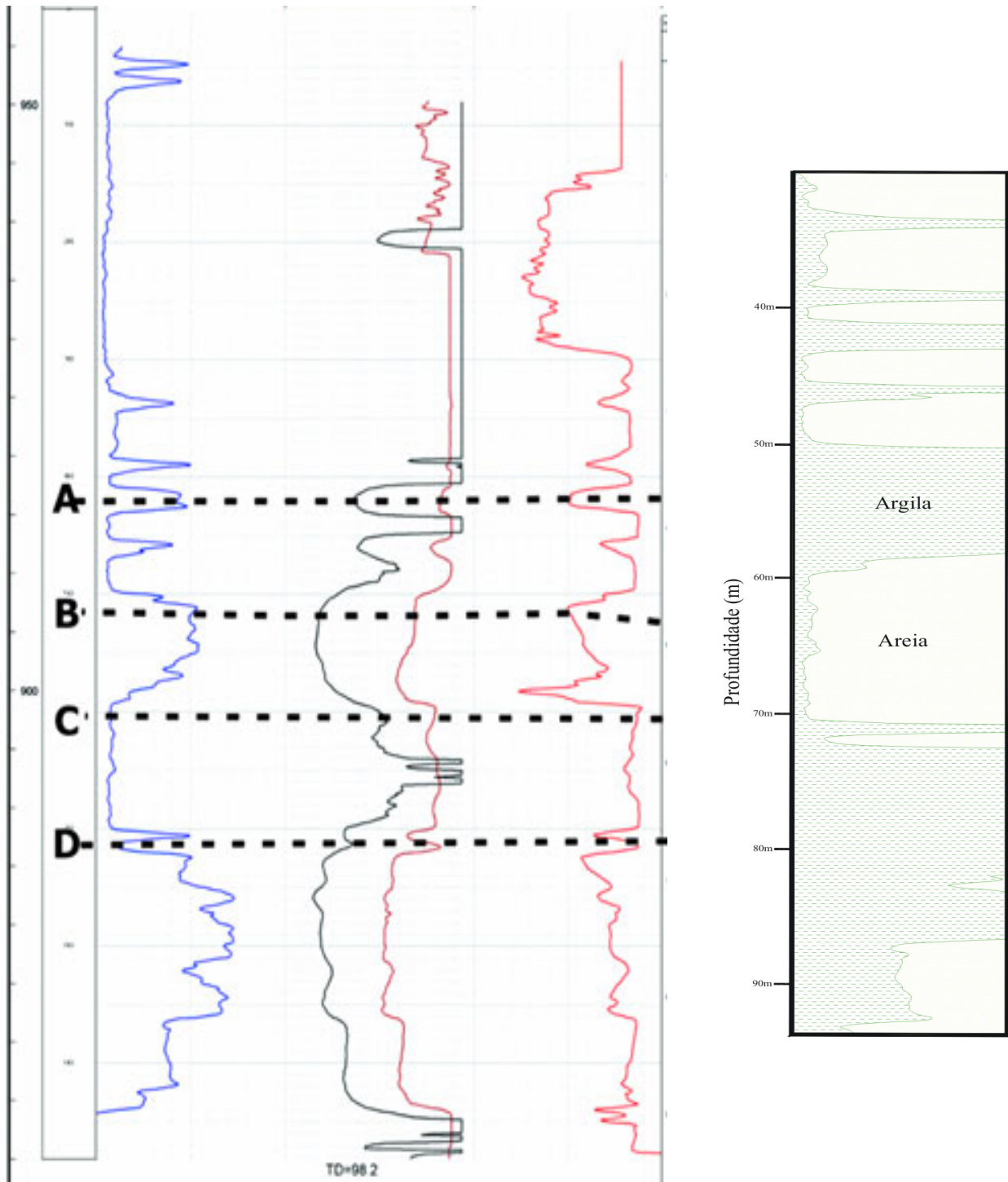


Figura 12 – Perfis: raios gama, resistividade, sônico e porosidade, respectivamente da esquerda para a direita, e a calibração com o perfil litológico (lado direito).
Figure 12 – Well logs: gamma rays, resistivity, sonic and porosity, respectively from left to right and calibration by lithological profile (right side).

É possível correlacionar alguns refletores com feições geológicas ao se realizar a análise integrada dos dados. Por exemplo, pode-se correlacionar o refletor 1 assinalado na figura 13 como representativo do nível de sedimentos finos intercalados ao arenito, encontrados a aproximadamente 40m de profundidade. O refletor 2 pode

ser correlacionado com a Formação Lagoa Azul. É um refletor bastante irregular e com profundidade variando entre 60m e 80m, na seção sísmica. Já o refletor 3 pode ser correlacionado com o topo da Fm. Ponta Grossa.

Outro exemplo de correlação pode ser visto na figura 14 para a linha 1A. Observando-se com atenção esta figu-

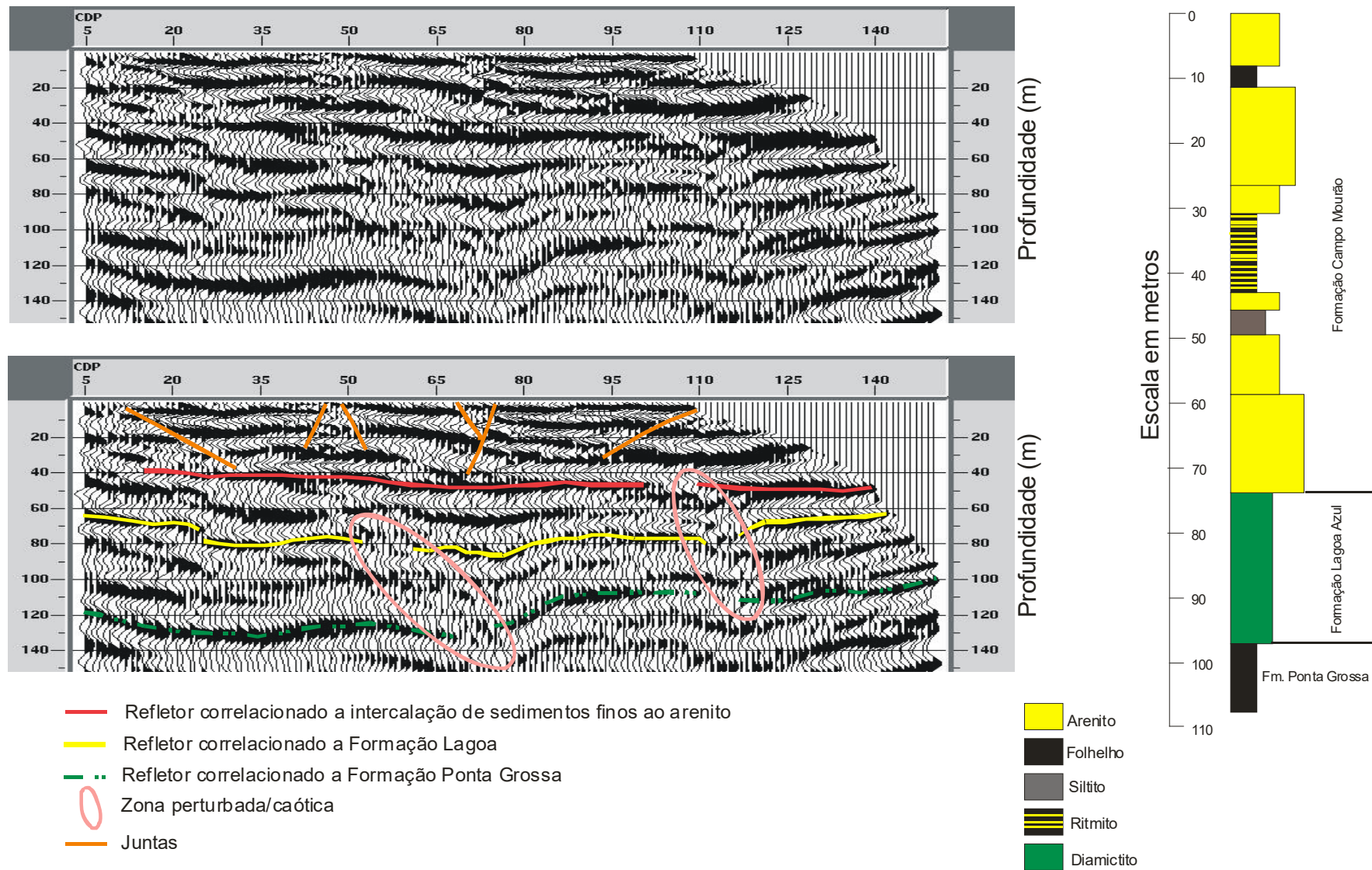


Figura 13 – Seção sísmica da linha L3A - correlação com o perfil litológico do poço.
Figure 13 – Seismic section of line L3A - correlation with lithological wellbore profile.

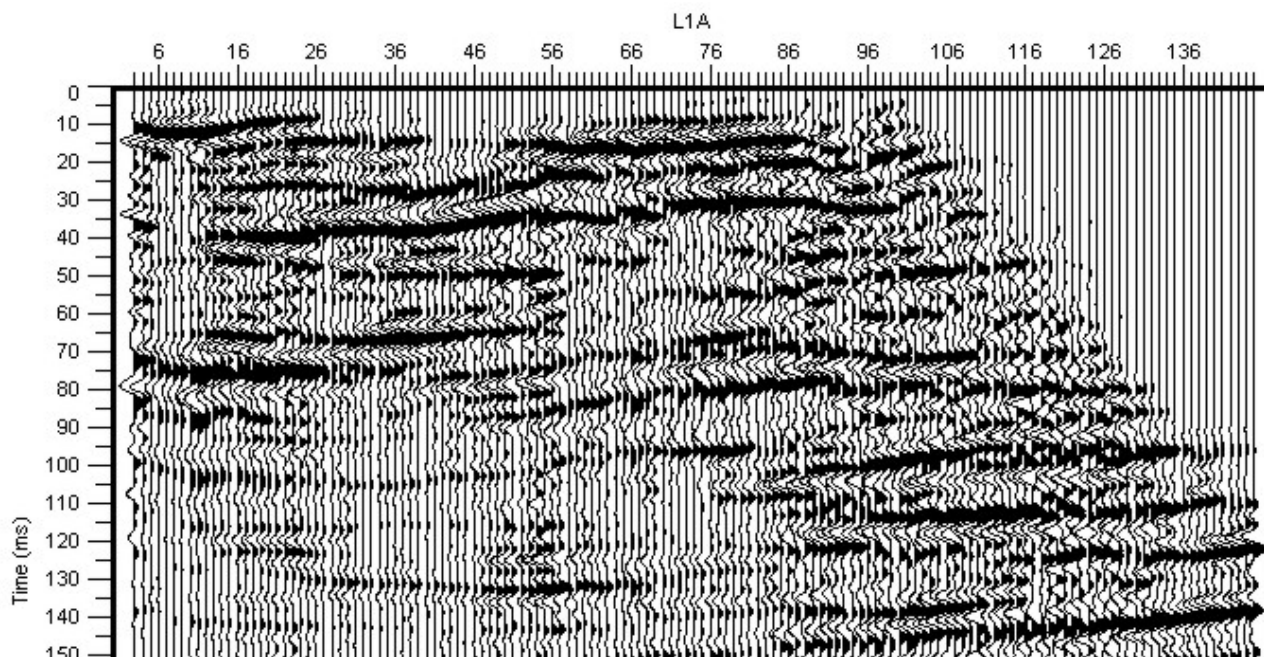


Figura 14 – Seção sísmica da linha L1A em tempo.

Figure 14 – Seismic section of line L1A in time.

ra, nota-se a presença de um refletor por volta de 40ms que é correlacionável ao refletor 1 da figura 13. Assim também os refletores marcados por volta de 70ms e 100ms são correlacionáveis aos indicados como 2 e 3, respectivamente.

De um modo geral, é importante observar que, além dos refletores que foram trabalhados, vários outros estão presentes nas seções sísmicas, assim como feições estruturais e estratigráficas. Para explicar cada uma destas feições requer-se ainda muito trabalho. Estes dados ainda precisam ser estudados e interpretados mais detalhadamente. Aqui apenas se cumpriu o objetivo do estudo proposto, que foi definir os parâmetros de aquisição para a sísmica de reflexão rasa, de forma que se obtivessem imagens da subsuperfície representativas da realidade geológica da área.

Conclusões

A utilização da sísmica de reflexão rasa vem crescendo, principalmente nos países com maior desenvolvimento tecnológico, mas ainda há limitações. Uma delas relaciona-se à frequência do sinal, que deve ser suficientemente alta para permitir a alta resolução requerida, com a identificação das camadas geológicas de interesse e a separação das reflexões dos demais eventos coerentes como ondas diretas, refrações e *ground roll*.

Para levantamento sísmico de reflexão de alta resolução deve-se ter um conhecimento mínimo inicial da resposta sísmica da área que se vai pesquisar. No caso da área da Rivadávia, na qual se desenvolveu este estudo, não se conhecia relato de ensaios sísmicos anteriores. O primeiro passo consistiu então na realização de ensaios rápidos de refração e análise de ruído, para conhecer as atuais condições de campo e resposta sísmica. Uma estimativa da resposta sísmica, baseada apenas na ge-

ologia, tem grande probabilidade de ser errada na área estudada, pois era difícil imaginar que os arenitos aflorantes chegassem a uma velocidade de 2000m/s. Foram características específicas que lhe deram esta velocidade. Além disso, o desenho do levantamento de reflexão CMP requer ensaios preliminares para melhor parametrização.

Dentre as dificuldades encontradas, vale salientar o freqüente afloramento de rocha que dificultou o acoplamento dos geofones e a instalação do tiro do rifle na profundidade adequada. Outro fator relevante, que solicitou muito do processamento dos dados, foi o baixo contraste de impedância acústica existente entre o arenito silicificado e o folhelho.

Quando a resposta sísmica é boa (bons refletores), o levantamento é mais fácil e rápido. Quando a resposta não é tão boa, ausência de refletores marcantes (visíveis no domínio do tiro), como o caso da Rivadávia, leva-se um tempo maior para desenvolver a confiança nos dados e para certificar-se de que os parâmetros de aquisição são os mais adequados. Nesta situação também se requer muito mais esforço no processamento dos dados para se chegar ao imageamento satisfatório. Apesar destas dificuldades, foram gerados dados sísmicos da melhor qualidade e identificaram-se dois importantes refletores, que demarcam o contato da Formação Campo Mourão com a Formação Lagoa Azul e da Formação Lagoa Azul com a Formação Ponta Grossa.

O método sísmico de reflexão de alta resolução, aplicado pela primeira vez sobre arenitos fraturados do grupo Itararé, contribuindo para um estudo abrangente de modelagem de análogos a reservatórios fraturados, demonstrou-se eficaz na área de estudo, determinando os principais refletores esperados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CTPETRO/FINEP/PE-TROBRAS pelo financiamento e a UFPR pelo apoio institucional.

Agradecemos ainda a todos os colegas do projeto MO-DRES que participaram das campanhas de campo e con-

tribuíram com outras informações importantes para este estudo. Nosso reconhecimento particular aos bolsistas de graduação que ajudaram durante a aquisição dos dados.

Em especial agradecemos ao Doutor Renato Luiz Prado e à Doutora Liliana Alcazar Diogo do IAG/USP pelo conhecimento transmitido e discussões construtivas.

Referências

- Appi, C. J., Rostirolla, S. P. 2004. Modelagem da anisotropia em sistemas fraturados a partir de estudos de alta resolução na Bacia do Paraná, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 12: p. 125-147.
- Dobrin, M. B. *Introduction to Geophysical Prospecting*. USA: New York, McGraw-Hill International Book Company, 1976. 630 p.
- França, A. B., Potter, P. E. 1988. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (parte 1). *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 2: p. 147-191.
- França, A. B., Winter, W. R., Assine, M. L. 1996. Arenitos Lapa-Vila Velha: Um modelo de sistemas subaquosos canal-lobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(1):43-56.
- Knapp, R. W., Steeples, D. W. 1986a. High-resolution common depth point seismic reflection profiling: instrumentation. *Geophysics*, 51, n. 2, p. 276-282.
- Knapp, R. W., Steeples, D. W. 1986b. High-resolution common depth point seismic reflection profiling: field acquisition parameter design. *Geophysics*, 51, n. 2, p. 283-294.
- Landmark Graphics Corporation, 2003. ProMAX - Seismic processing software for use with UNIX. Versão: 2003.3.3.
- Prado, R.L. 2000. *A sísmica de reflexão rasa e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: um estudo na cidade de São Paulo-SP, Brasil*. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 177 p.
- Rostirolla, S.P, Assine, M. I., Fernandes, L. A., Arthur, P. C. 2000. Reativação de paleolinhamentos durante a evolução da Bacia do Paraná: o exemplo do Alto Estrutural de Quatiguá. *Revista Brasileira de Geociências*, 31:639-648.
- Rostirolla, S.P, Appi, C.J., Mancini, F., Kraft, R.P., Bartoszeck, M.K. 2001. Fraturas controladoras da migração de fluidos nos Arenitos Vila Velha, Grupo Itararé, Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 31:349-356.
- Steeple, D.W., Miller, R.D. 1990. Seismic-reflection methods applied to engineering, environmental and groundwater problems. In: *Geotechnical and environmental geophysics, 1, Review and Tutorial*, Ward, S., Ed., *Investigations in Geophysics* nº 5, SEG, p. 1-30.
- Trzaskos-Lipski, B., Rostirolla, S. P., Vesely, F. F., Bocardí, L, Mancini, F., Appi, C. J. 2003. Microtectônica e sua importância no estudo da circulação de fluidos em reservatórios fraturados do Grupo Itararé – Bacia do Paraná. In: SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos – SNET, 9, Búzios, Rio de Janeiro, Anais, 1: p. 361.
- Yilmaz, O. 2001. *Seismic Data Processing*. Edited by Stephen M. Doherty. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. 1000 p.