

FLUXO DE PROCESSAMENTO APLICADO A DADOS DE SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM AMBIENTE DE PLATAFORMA CONTINENTAL. EXEMPLO: MACAU-RN

Moab Praxedes Gomes¹, Helenice Vital^{1,2} e José Wilson de Paiva Macedo³

Recebido em 3 abril, 2009 / Aceito em 27 dezembro, 2010
Received on April 3, 2009 / Accepted on December 27, 2010

ABSTRACT. This paper presents a proposal for a processing flow applied to high-resolution seismic data. It is organized in the implementation steps of operations and takes in account different factors in the flow organization. Usually used as raw data, the high resolution seismic processing is little discussed in literature. It differentiates in many aspects of processing used in conventional seismic data. The application of the processing flow to shallow seismic data was based on key criteria such as: behavior of a wave of high frequency, properties of the environmental, operation of the filters, gain, which allowed to obtaining a result with a better quality than the raw data. The flow defaults a logical sequence of procedures (header edition, filter, gain, deconvolution) for this kind of data, with basic steps, necessary for a general flow, and some additional processes, revealing potential problems and their solutions.

Keywords: shallow seismic, seismic processing, continuous acoustic profiling.

RESUMO. Este trabalho apresenta uma proposta de fluxo de processamento para dados de sísmica de alta resolução sistematizando em suas etapas a aplicação de operações que ponderam diversos fatores na organização desse fluxo. O processamento desses dados, até então pouco empregado (utilizavam-se os dados brutos) e raramente abordado na literatura, diferencia-se em muitos aspectos do processamento usado na sísmica convencional. A aplicação do fluxo de processamento dos dados de sísmica rasa baseou-se em critérios fundamentais (comportamento de uma onda de alta frequência, propriedades do meio, funcionamento dos filtros, tipo de ganho), os quais possibilitaram a obtenção de um resultado com qualidade muito superior ao dado bruto. O fluxo padroniza uma sequência lógica de processos (edição do traço, ganho, deconvolução) para esse tipo de dado, contando com etapas básicas (necessárias para um fluxo geral), e alguns processos suplementares, revelando possíveis dificuldades e suas soluções.

Palavras-chave: sísmica rasa, processamento sísmico, perfilagem sísmica contínua (PSC).

¹Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, PRH-ANP 22, Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental – GGEMMA – E-mail: moabpx@yahoo.com.br

²Departamento de Geologia – DG – E-mail: helenice@geologia.ufrn.br

³Departamento de Física Teórica e Experimental – DFTE – E-mail: wilson@dfte.ufrn.br

INTRODUÇÃO

A geofísica de alta resolução, acústica de alta resolução ou perfilagem acústica contínua (Sieck & Sief, 1977) compreende métodos geofísicos (ecossondas mono ou multifeixe, sonografia de varredura lateral e perfilador de subfundo) que investigam meios em pequenas profundidades (por este motivo também chamada de sísmica rasa) com espectros de alta frequência, empregando os mesmos princípios de reflexão da sísmica convencional. Entretanto, são diferentes os seus sistemas de aquisição de dados, as fontes acústicas, os espectros de frequências emitidos, os receptores, os sistemas de processamento e até mesmo as formas de apresentação dos dados.

Em geral os dados de sísmica rasa têm sido utilizados na sua forma bruta e referências a processamento dos mesmos são praticamente inexistentes ou pouco abordadas na literatura (e.g. Brunetta, 2005; Costa, 2004). Apesar do dado de sísmica rasa apresentar alta resolução muitas vezes torna-se impraticável sua visualização devido à grande quantidade de ruídos, sendo necessário algum tipo de tratamento pós-aquisição. A resolução desse método sísmico é superior à sísmica convencional e seu alcance de subfundo é de profundidades mais rasas (70 metros para a área de estudo). Seus dados brutos possuem respostas e ruídos de aquisição que derivam das relações entre as propriedades do método e o ambiente de aplicação (interação das altas frequências com o meio atravessado, ruídos da embarcação e do uso de flutuadores para o equipamento, não compensação das ondas do mar, atenuação com a profundidade e com o tipo de material, registro de chegada múltipla de sinal, dentre outros).

O processamento desses dados diferencia-se em muitos aspectos do processamento utilizado na sísmica convencional. Visando reduzir essa limitação, a proposta da organização de um fluxo de processamento para dados de sísmica de alta resolução, sistematizando a aplicação prática de processos em suas etapas, centraliza o principal objetivo deste trabalho.

A aplicação de um fluxo pode tornar-se dispendiosa no processamento de diferentes dados, no entanto, seguindo-se alguns procedimentos de análise de alguns parâmetros tais como: comportamento de uma onda de alta frequência, impedância acústica, funcionamento dos filtros, tipo de ganho, é possível a obtenção de um resultado com qualidade superior ao dado bruto. Assim, o presente fluxo foi proposto para aplicação aos dados de sísmica rasa. Foram utilizados os dados levantados com um perfilador de subfundo tipo *chirp* (SB-0512i – EdgeTech), no ambiente da Plataforma Continental Brasileira adjacente a Macau-RN, nordeste do Brasil (Fig. 1), durante campanhas dos Projetos POTMAR e SISPLAT (REDE 05-FINEP-CTPETRO-PETROBRAS-Marinha do Brasil).

ÁREA DE ESTUDO

Os dados sísmicos utilizados neste estudo foram levantados em uma área localizada no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, adjacente ao município de Macau. Esta área encontra-se inserida no arcabouço geológico da Bacia Potiguar imersa onde a principal feição de interesse é um vale inciso sobre a Plataforma Continental (Pessoa Neto, 2003; Vital et al., 2005, 2008; Schwarzer et al., 2006; Gomes et al., 2008, Gomes & Vital, 2008, 2010), entre a foz do Rio Açu e a quebra da plataforma (Fig. 1). Esta região é caracterizada como uma plataforma mista composta por sedimentos siliciclásticos, biosiliciclásticos e carbonáticos (Pessoa Neto, 2003; Vital et al., 2005, 2008), que abriga diversos compartimentos de relevo como dunas submersas, recifes e *beachrocks*, vales afogados, dentre outros que conformam a atual exposição da bacia (Gomes et al., 2007; Vital et al., 2008). O local apresenta rochas sedimentares do Neogeno e é composto por três unidades litoestratigráficas denominadas Formação Tibau (arenitos e conglomerados), Formação Guimarães (calcários) e Formação Ubarana (folhelhos marinhos). Estas unidades compõem um grande ciclo regressivo iniciado no Neocampaniano, estendendo-se até o Holoceno, formando um sistema costeiro-plataforma-talude-bacia (Pessoa Neto, 2003).

METODOLOGIA

Os dados sísmicos processados neste trabalho foram adquiridos com um perfilador de subfundo 3200-XS composto por uma plataforma integrada de computador/amplificador e um veículo hidrodinâmico de sensores (peixe) do tipo *chirp* modelo SB-0512i, de 0,5-12 kHz, fabricado pela EdgeTech. Como meio flutuante foi utilizado o navio balizador Cmt. Manhães, pertencente à Marinha do Brasil (Serviço de Sinalização Náutica do Nordeste).

O *ReflexWin 4.5* (K.J. Sandmeier) foi o programa utilizado na aplicação prática da parametrização da sequência de processos, que contou com etapas básicas de um processamento sísmico, necessárias para um fluxo geral, e alguns processos suplementares que podem ser utilizados a fim de melhorar a performance do processamento (tempo de máquina) e/ou da qualidade dos dados. Além dos fins da interpretação dos dados, também é possível aperfeiçoar a configuração dos parâmetros de aquisição do dado, como por exemplo, o espectro de frequência do pulso e a frequência de emissão.

O processamento aplicado ao dado de sísmica rasa foi desenvolvido com algumas modificações no fluxograma de um processamento de sísmica convencional a fim de se adaptar ao imageamento de subsuperfície, centralizando as principais etapas do processamento com os objetivos de se editar a geometria do traço, extrair ou atenuar ruídos que se apresentam no domínio

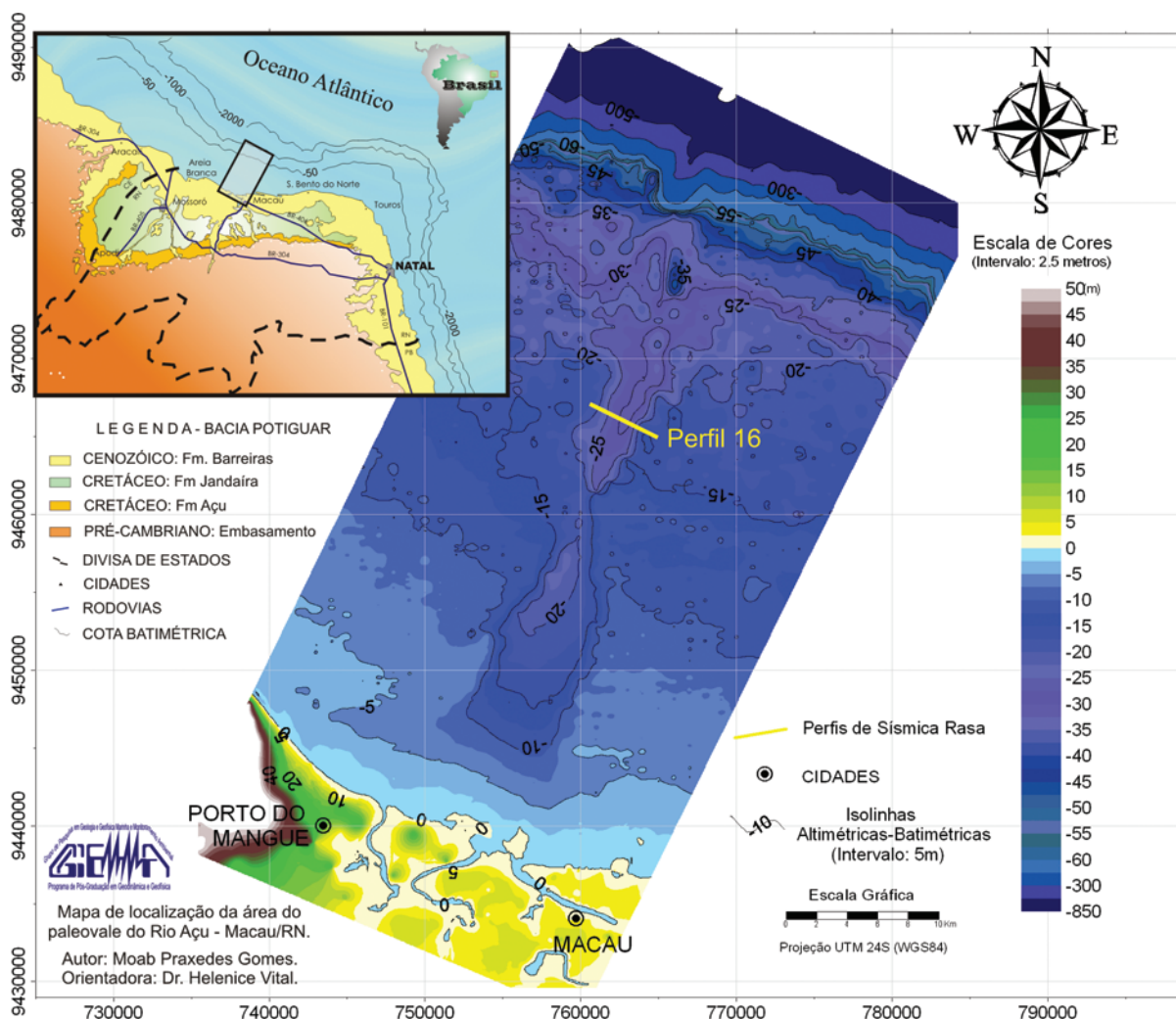


Figura 1 – Área do trabalho, com isolinhas batimétricas do paleovalle do Rio Açú e localização do perfil sísmico 16 (linha amarela), selecionado para validar a proposta do fluxo de processamento. Localização geográfica e contexto geológico podem ser observados no detalhe.

da frequência e da amplitude, além de atenuar múltiplas de fundo marinho, equalizar a amplitude e o decaimento de energia do sinal e interpretar a seção.

Os recursos disponíveis do programa *ReflexWin 4.5* foram utilizados para validar a elaboração e a aplicação do fluxo de processamento para os dados de sísmica rasa. Este programa possui módulos interativos para processamento e interpretação de dados de sísmica 2D, em particular o *2D-Data-Analysis*, suportando diversos padrões de gravação desses dados, inclusive o formato de aquisição (*.jsf) do programa *Discovery SB 3100* da EdgeTech.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O perfil 16 compreende uma seção transversal ao paleovalle do Rio Açú, apresentando seu dado na forma bruta (apenas parametrizado na aquisição), selecionada para a demonstração da

aplicação do fluxo de processamento. O fluxo proposto é apresentado na Figura 2, sendo dividido em seis etapas com suas subdivisões e aplicações:

- Leitura do Dado – Reformatação dos dados brutos para formato interno do módulo *2D-Data-Analysis* do *ReflexWin 4.5*;
- Geometria – Distância entre traços e localização por coordenadas XY, correção com a topografia. Inserir/extrair traços, remoção da lâmina d’água (quando conveniente), corte do tempo duplo, unir arquivos, entre outras;
- Análise Espectral – Correção das amplitudes: visualização e correlação dos espectros de amplitude, tempo, frequência, número de onda. Deve ser realizada em todas as etapas que utilizem algum tipo de filtragem;

- Ganhos e Filtros – Compensação da divergência geométrica e decaimento da energia; filtros passa-banda; funções de ganho; ganho *AGC*; ganho manual (γ); média de traços;
- Deconvolução – Deconvolução preditiva: atenuação de múltiplas do fundo do mar;
- Interpretação da Seção Sísmica – Identificação das informações geológicas contidas no dado de alta resolução.

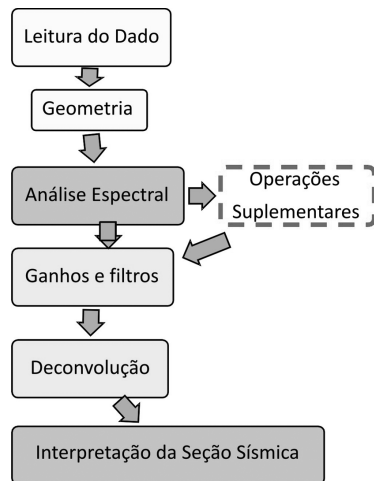


Figura 2 – Fluxograma de processamento geral e com operações suplementares para os dados de perfilagem sísmica de subfundo de alta resolução.

Leitura do dado

Os dados brutos de sísmica rasa, coletados com o perfilador de subfundo *X-Star* (tipo *chirp*), foram gravados no formato de aquisição da EdgeTech *.jsf utilizando-se o programa de aquisição *Discovery SB 3100* da EdgeTech. O formato interno do *Discovery* armazena dados em uma variação do formato SEG-Y. A variante JSF elimina o padrão SEG-Y EBCDIC e os cabeçalhos binários, e acrescenta uma mensagem no início do cabeçalho de cada traço. O formato do dado consiste numa coleção de traços gravados com os seguintes componentes: 16 bytes de mensagem de cabeçalho (*message header*); 240 bytes cabeçalho do traço (*trace header*); e dados do traço.

As linhas sísmicas selecionadas com formato de entrada do dado bruto (*.jsf) foram convertidas para o formato interno (taxa 16 ou 32 bits) do ambiente *ReflexW*, e carregadas através do módulo usado para processamento, o *2D-Data-Analysis*.

Ao importar o dado para o ambiente do *ReflexW* faz-se uma primeira visualização do dado, onde há algumas opções de visualização: escala, palheta de cores, enquadramento, entre outros. A manipulação do dado nesta etapa não é permanente, não gera outro dado processado, o que permite modificar a palheta de cores, modo de visualização dos traços (interpolado

ou *wiggle*), preenchimento positivo ou negativo do sinal, escala, ganho (proporção de amplitudes, contraste) e títulos.

Geometria do dado

Esta é a fase de processamento na qual são inseridas as informações a respeito da localização de cada fonte e cada receptor, no caso do transdutor *X-Star*, a localização de cada traço, através de suas coordenadas. Essas informações serão inseridas no cabeçalho dos traços sísmicos, preferencialmente no início do processamento, permitindo que todas as etapas posteriores possam ser realizadas.

Em geral não há grandes prejuízos na formatação do dado, porém algumas imprecisões nas informações sismoestratigráficas podem ser acumuladas. Como a velocidade da embarcação não é constante na escala de tempo de registro dos traços sísmicos, a distância entre os traços pode variar muito, outro fator é a não coincidência do registro do dado sísmico com a emissão do sinal do GPS, ou seja, há uma defasagem entre o registro do traço sísmico e a recepção da coordenada do GPS, que implica numa imprecisão de georreferenciamento por ausência de informação.

A primeira correção geométrica realizada em campo refere-se ao *offset* (distância entre o transdutor e a antena do GPS), o qual foi calculado em 46 metros e automaticamente corrigido pelo programa *Discovery* durante a aquisição digital.

O perfil 16 utilizado para exemplo do processamento é um perfil transversal ao vale do Rio Açu, o qual possui 23.402 traços distribuídos ao longo de 7955 metros de linha sísmica. As coordenadas (UTM) foram inseridas no cabeçalho dos traços que identifica a distância entre os traços (*trace increment*), que para o perfil 16 foi de 0,34 m, e a orientação do perfil (podendo ser invertida).

Outras operações de caráter suplementar podem ser realizadas. A remoção da lâmina d'água na seção sísmica, através do silenciamento (*muting*), pode ser útil na otimização de tempo e precisão de processamento e minimização da saturação visual (Fig. 3). Porém essa correção estática pode não ser conveniente quando se deseja identificar fenômenos na coluna d'água, como por exemplo escapes de gás, muito comum na área de estudo.

Em muitos casos o processamento não consegue retirar múltiplas de amplitude altas, impedindo a identificação de qualquer informação sismoestratigráfica abaixo dela. Dessa forma, dependendo da morfologia da múltipla, torna-se aplicável a remoção de parte da seção através do corte do tempo duplo.

Com relação às correções na topografia de fundo, ressalta-se a logística do levantamento. Quando o perfilador sísmico faz uso de flutuadores (e compensador de ondas) ao ser rebocado, a

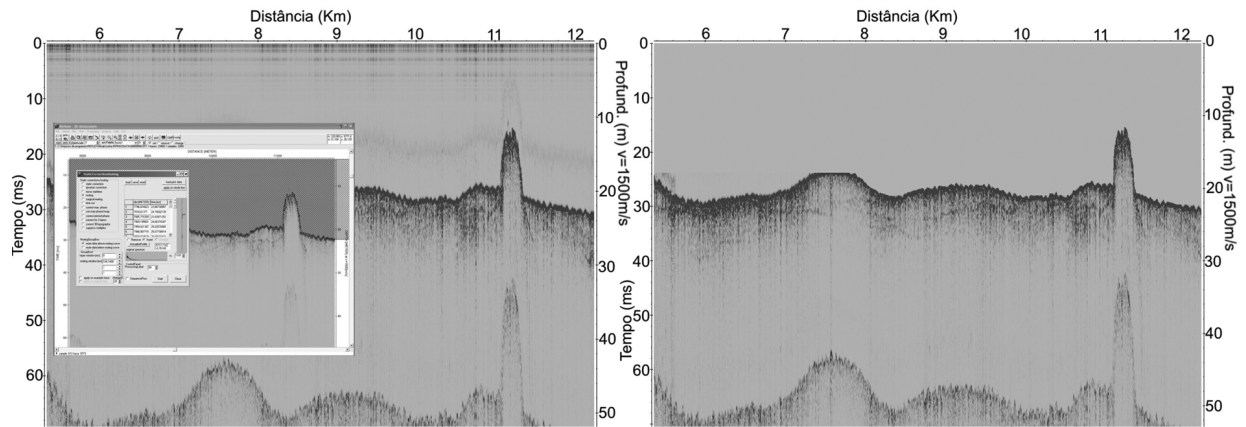


Figura 3 – Exemplo de seção sísmica com a remoção dos sinais da porção da lâmina d'água.

correção pode ser realizada sobre a diferença de profundidade entre o sensor e a interface ar/água, com a compensação das ondas e da maré. Na ausência de flutuadores a topografia deve ser corrigida por meio de dados batimétricos, os quais são interpolados aos sinais dos traços no refletor da interface água/fundo marinho.

Por vezes a gravação dos dados separa feições de interesse em arquivos diferentes. Para se obter uma única seção sísmica é possível unir esses arquivos, adicionando ou extraindo traços de seções provenientes de arquivos diferentes.

Quando a quantidade de traços em uma seção é “excessiva” o tempo de testes e adaptação do fluxo de processamento pode se tornar oneroso. Uma solução seria extrair uma pequena parte do dado e utilizá-lo para testes, e só então aplicar o fluxo de processamento ao dado inteiro posteriormente.

Análise espectral do dado

Durante o processo de aquisição uma quantidade de sinais é captada com valores incoerentes (ruídos) que resultam de interferências ambientais, antrópicas ou eletromagnéticas (Robinson & Treitel, 1980). O perfilador *X-Star* emite um pulso de frequência modulada FM num dado intervalo de tempo (ms). Esses pulsos carregam uma faixa de altas frequências (ex. 0,5-7,2 kHz), que ao se propagar nas camadas, refletir nas interfaces e retornar ao sensor, formará o traço sísmico. O registro das reflexões pode apresentar a multiplicidade da captação de reflexões, registradas em tempos diferentes, dificultando a identificação das estruturas. Grande parte dos ruídos apresenta valores de amplitude próximos às amplitudes naturais, portanto, de difícil distinção pelos métodos existentes no tratamento destes dados (Houlding, 1994).

A análise do dado bruto e identificação da existência de ruídos podem ser feitas visualmente ou por análise espectral.

A análise espectral marca o início dos processos voltados para correção das amplitudes no dado sísmico. Visualizar e correlacionar os espectros de amplitude, tempo, frequência, número de onda possibilita uma aplicação mais acurada das correções (equalização) de amplitude no dado e a seleção de parâmetros para a aplicação de filtros.

O espectro de frequências dos traços (Fig. 4) do perfil 16 demonstra uma forte concentração de frequências entre 3 e 5 kHz. Esses valores de frequência que predominam no dado estarão com maiores valores de amplitude (presentes nos refletores). Isso permite identificar parte das anormalidades do dado e tomar por base como parâmetros para se fazer um balanceamento espectral (*spectral whitening*).

A Figura 5a apresenta a seção sísmica e uma imagem da soma dos espectros dos traços sísmicos correlacionados com o tempo, permitindo vincular a profundidade e a amplitude às faixas de frequência presentes no dado, sendo útil na correlação sinal-ruído. Este gráfico foi feito através da ferramenta *moving window spectrum*. Observa-se que entre 60 e 70 ms e 75 e 85 ms e 90 e 100 ms, nas faixas de frequência 1,5-6 kHz e 6-10 kHz, ocorre uma repetição do sinal com amplitude inferior, trata-se do ruído referente às múltiplas. Em torno da frequência de 1 kHz, sobre toda a janela de tempo, ocorre uma faixa de amplitude anômala e variada, relacionada ao ruído de fundo. No dado real o intervalo entre 0 e 10 ms refere-se à coluna d'água, já na distribuição do espectro está correlacionado com o ruído de superfície (interfaces).

Os parâmetros supracitados evidenciam a distribuição e as origens das frequências e amplitudes no dado sísmico, ou seja, em quais faixas de frequência estão os refletores de interesse (sinal), que permitem fazer associações entre sinal e ruído. A presença simultânea de sinal e ruído dificulta o processamento

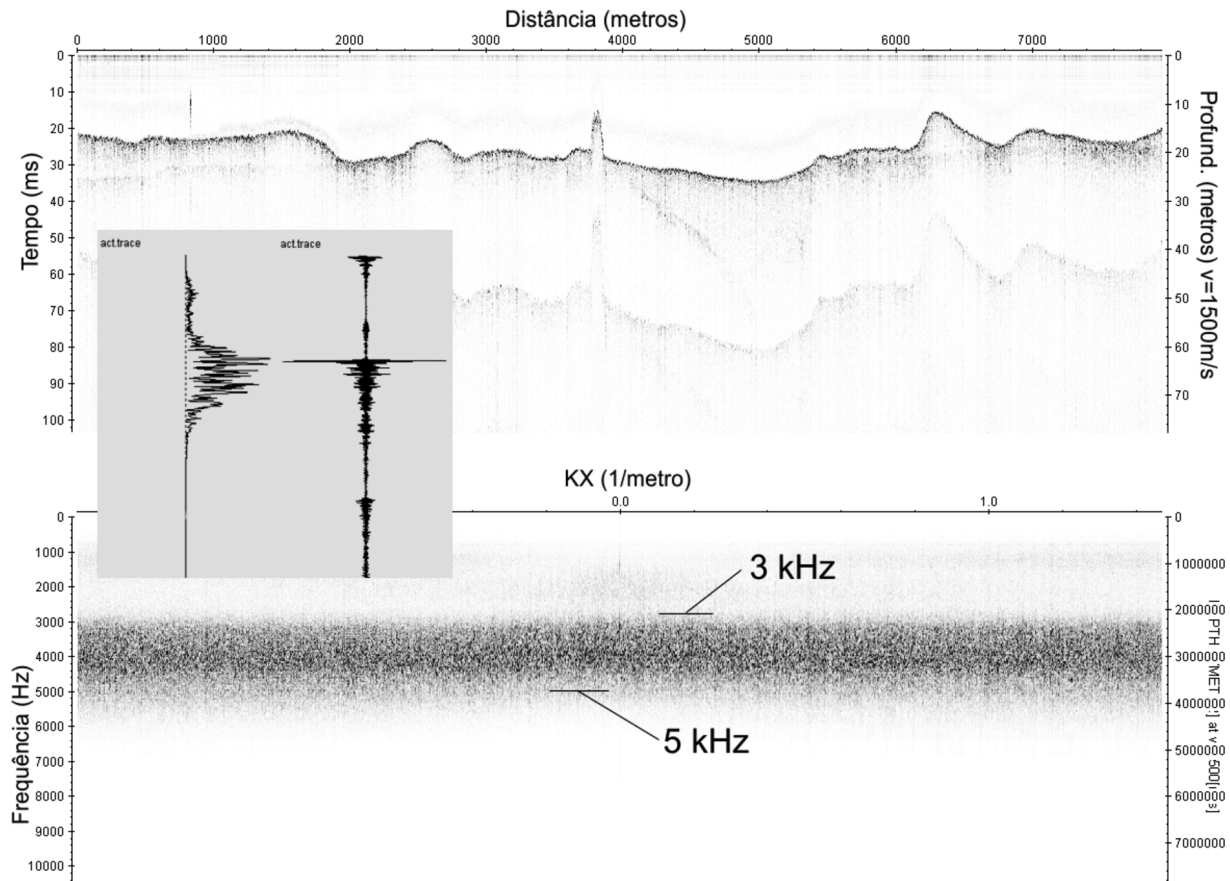


Figura 4 – Imagem do espectro de distribuição no domínio FK (frequência/nº de onda) mostrando a concentração das amplitudes significativas nas frequências entre 3 e 5 kHz.

e a interpretação do dado, essa dificuldade pode ser minimizada eliminando-se frequências e ressaltando amplitudes conhecidas, através de filtros de frequência e funções de ganhos, ou por balanceamento espectral.

O balanceamento espectral “*spectral whitening*” (Claerbout, 1975; Yilmaz, 1987), pode ser admitido como uma aproximação da deconvolução de fase-zero, pois não modifica a fase do sinal, mas somente no espectro de amplitude (nivelar o espectro de uma determinada faixa de frequências). Esta ferramenta de filtragem é útil para correção de ruídos na frequências do traço sísmico, melhorando a resolução temporal e espacial do sismograma. A Figura 5b apresenta a equalização do espectro de frequências de uma seção balanceada.

O espectro de tempo *vs.* frequência permite obter informações a mais que a simples observação do histograma de frequência ou da seção sísmica, podendo relacionar a distribuição das amplitudes e frequências do dado original. A análise espectral do dado forneceu a ilustração exata de quais aspectos sofreram modificações com a aplicação do filtro, mostrando que, por mais

que possam parecer semelhantes, os dados se apresentam de forma diferente. A análise espectral deve ser realizada em todas as etapas que utilizam algum tipo de filtragem, no intuito de se observar as mudanças provocadas pela aplicação dos filtros.

Ganhos e filtros

Observa-se nos traços que ocorre um rápido decaimento de energia com o tempo de propagação limitando a profundidade de investigação. A perda por espalhamento geométrico é a principal causa para o decréscimo da amplitude, pois a amplitude do pulso sísmico na frente de onda diminui à medida que ela se espalha, logo em seguida pela absorção e transmissão. Um dado dominado por baixas amplitudes dificulta o reconhecimento dos refletores e a sobreposição de altas e baixas frequências mascaram os refletores.

A aplicação de filtros e ganhos tem por fim a correção da atenuação do sinal e eliminação de alguns dos ruídos, como o próprio resíduo dos filtros, ressaltando os eventos de reflexão.

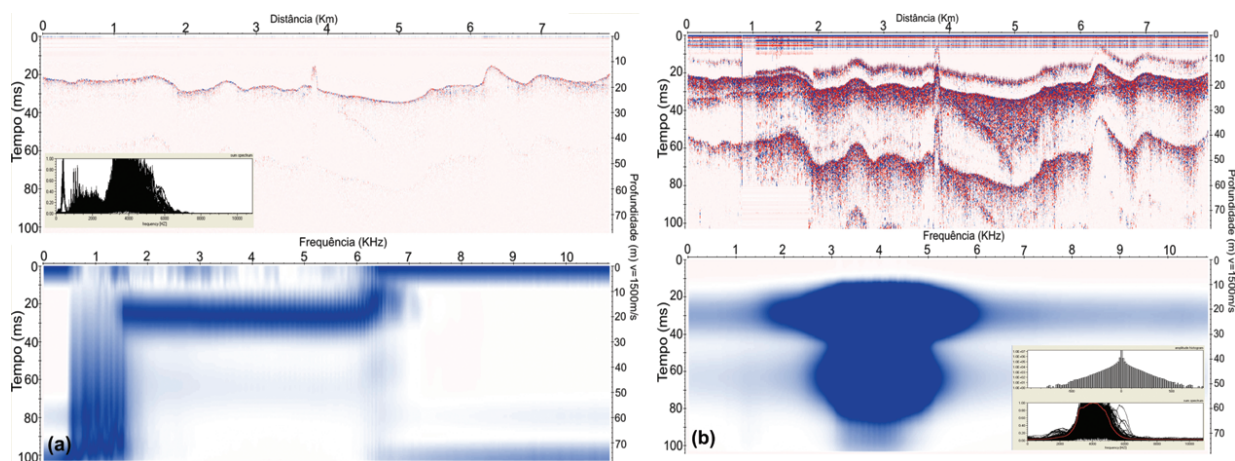


Figura 5 – (a) Seção Sísmica; Histograma de frequências; Espectro Tempo vs. Frequência. (b) Seção Sísmica após o balanceamento espectral; Espectro Tempo vs. Frequência da seção balanceada; Histogramas de amplitude e de frequências.

Filtros que operam em faixas de frequência são importantes para remover fontes específicas de ruídos, comumente delimitados em uma faixa de frequência distinta, sendo possível separar esse ruído do sinal. Na aquisição dos dados sísmicos são aplicados esses processos e mantidos desde o início do levantamento, porém não podem ser alterados durante a aquisição. Tais modificações de parâmetros causariam a descaracterização do registro das propriedades do ambiente imageado. Portanto sua aplicação se justifica num processamento posterior ao levantamento.

Foram utilizadas algumas porções do perfil 16 melhor escalonadas para exemplificar visualmente o resultado da aplicação de ganhos e filtros, onde se observam diferenças laterais de amplitude, decaimento de energia com a profundidade, ruídos de alta frequência e baixa razão sinal-ruído.

Através de testes e comparações foi verificada a melhor sequência de aplicação dos filtros de ganhos. Iniciando pelo filtro de frequência passa-banda, o qual remove as frequências indesejadas e reduzem ruídos de diversas origens, permitindo a passagem das frequências dentro da banda especificada.

Os parâmetros de frequência encontrados na etapa de análise espectral foram utilizados nesse filtro. Como resultado da aplicação do filtro passa-banda a seção filtrada apresenta regiões específicas, demarcadas na análise espectral, onde ocorreu uma atuação mais visível do filtro reduzindo o padrão caótico dos refletores (Fig. 6).

Comumente os ruídos de alta frequência são muito expressivos nos dados de sísmica de alta resolução, tornando a utilização de filtros específicos para a atenuação das altas frequências e o realce das baixas frequências. A Figura 7 mostra a influência

das altas frequências sobre o sinal sísmico. É observado em todo o dado um padrão retilíneo e oblíquo de altas frequências penetrando sobre os refletores da seção não filtrada, enquanto que após a filtragem pelo operador passa-baixa as altas frequências são atenuadas. Neste ponto é importante estar atento, pois o resultado do filtro pode remover ruídos de alta frequência, bem como os sinais de interesse também podem ser perdidos.

No intuito de suavizar o efeito de um ruído tipo serrilhado sobre os refletores, não removido na aplicação dos filtros supracitados, foi alterada a resolução espacial através da média entre os traços (Fig. 8). Observar que o filtro permite suavizar o dado, porém o aumento do número de traços utilizados na média provoca a horizontalização dos refletores eliminando informações das terminações dos refletores.

As próximas operações a realizar seriam as aplicações dos ganhos, com finalidade de solucionar o problema do decaimento da energia com a profundidade e das diferenças laterais de amplitude. Neste trabalho, a correção das amplitudes é feita aplicando funções de ganho, que podem ser empregadas em diferentes momentos, por exemplo, após a retirada da múltipla cria-se uma variação de amplitudes em uma janela do tempo duplo dificultando a visualização do resultado desta etapa do processo, assim torna-se cabível uma nova equalização do ganho.

Pelo menos quatro algoritmos de ganho podem ser aplicados independentemente: *AGC* (Controle Automático de Ganho), ganho manual no domínio y (*manual gain (y)*), compensação da divergência geométrica (*div. compensation*), função de ganho (*gain function*) (encontrados no menu *Gain*).

A ferramenta de ganho mais eficaz para esse processo foi a função ganho (*gain function*), que consiste no ajuste das ampli-

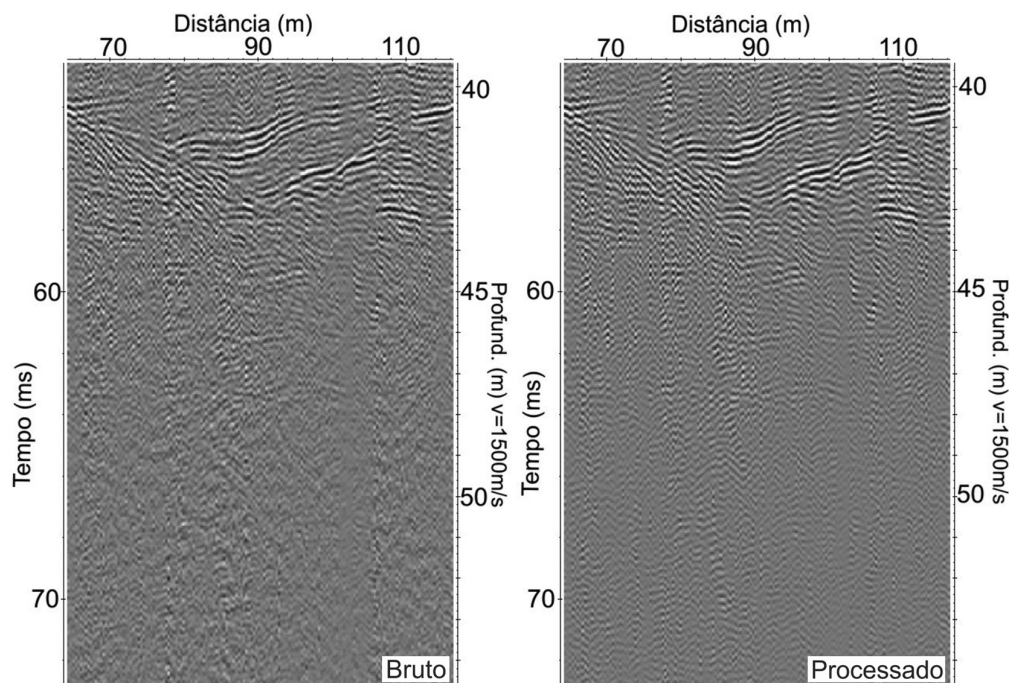


Figura 6 – Comparação entre uma seção não filtrada e outra com a aplicação do filtro de frequências passa-banda (*Bandpass frequency*).

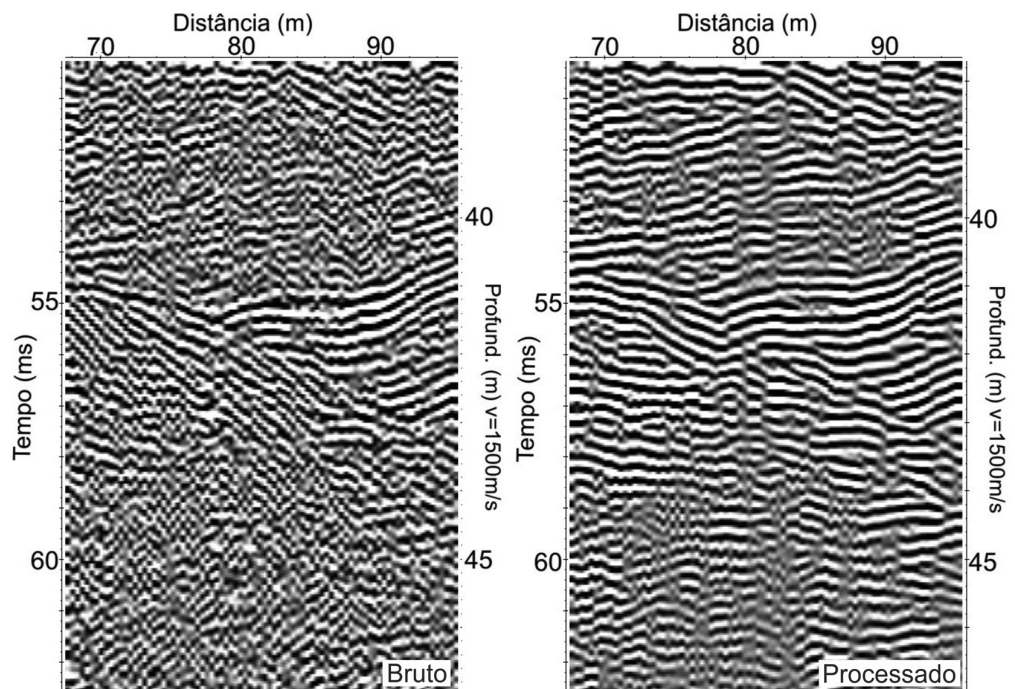


Figura 7 – Comparação entre uma seção com ruído de alta frequência e outra filtrada com passa-baixa.

tudes por uma determinada função que possui uma componente linear e outra exponencial. Útil para amplificar amplitudes em determinados intervalos de tempo (Fig. 9).

O *AGC* cria a distribuição equalizada das amplitudes na direção y (eixo do tempo) (Fig. 10), dentro de uma janela de tempo definida, através de cálculos em torno da média das

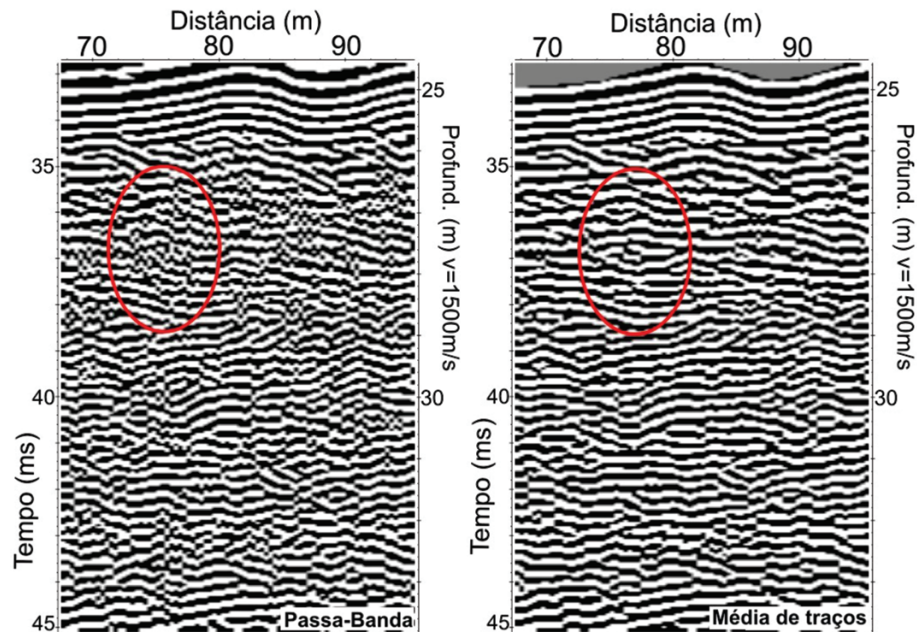


Figura 8 – Comparação entre a seção filtrada (passa-banda) e outra sob o filtro *running average* (com média entre três traços).

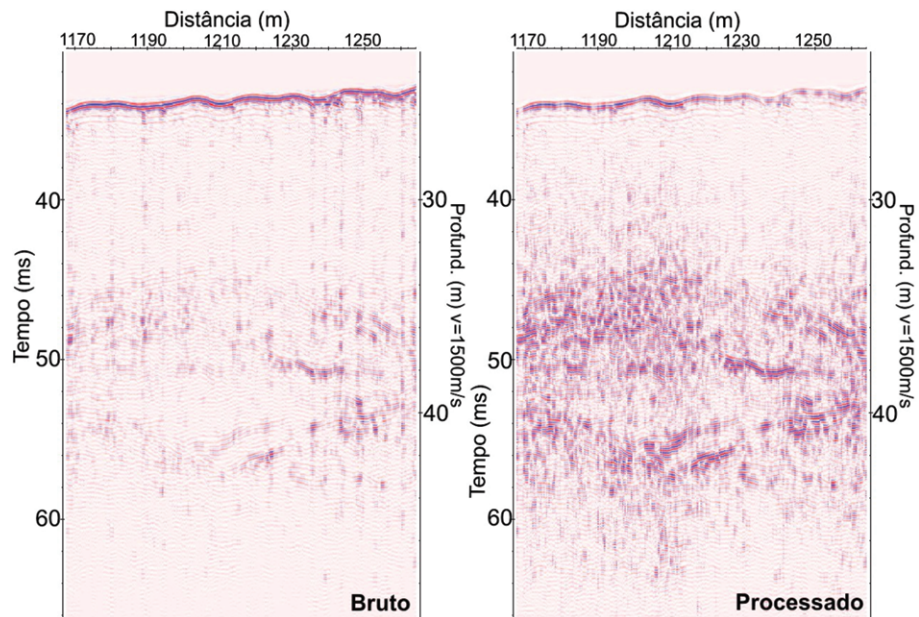


Figura 9 – Aplicação de filtro de ganho que realça a amplitude de determinadas frequências.

amplitudes (toda informação de ganho anterior é perdida). A atuação do ganho em pequenas janelas de tempo causa uma melhor distribuição das amplitudes; quanto maior for a janela, menor será o efeito.

Semelhante ao filtro *AGC*, o "*div. compensation*" equaliza o dado em função do tempo (eixo y) e serve para realizar a compensação/recuperação da perda de energia por divergência

geométrica, onde se aplica um fator de escala de ganho sobre a curva média de decaimento de amplitudes baseada em todos os traços (menu *Gain > div. compensation*).

Um ganho manual pode ser aplicado no dado digitalizando uma curva de ganho na direção y pela ferramenta *manual gain* (y) no menu *Gain*.

Os filtros principais e os suplementares até então citados

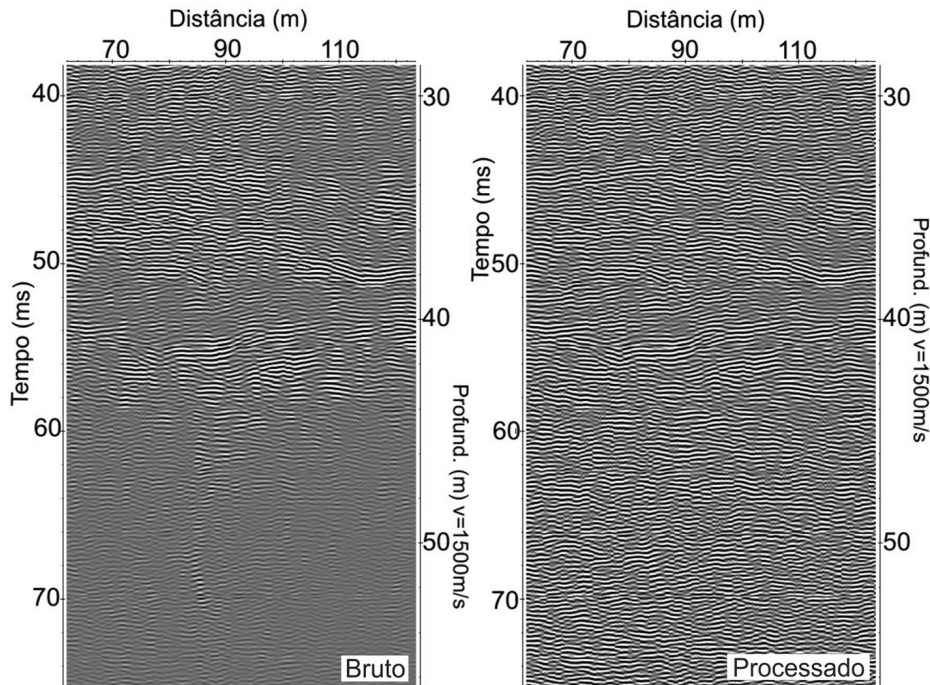


Figura 10 – Comparação entre a seção sem aplicação de ganho e outra sob o filtro AGC.

estão encaixados no início do processo, porém pode haver ocorrência em que será necessária a sua aplicação após o uso de outras ferramentas como por exemplo a deconvolução que altera as amplitudes.

Deconvolução

A resposta sísmica ou traço sísmico é descrita pela convolução da assinatura da fonte (*wavelet*), com o coeficiente de reflexão, mais ruídos. A deconvolução é correção determinística (filtro inverso) (Gadallah, 1994). Partindo de pressupostos estatísticos fez-se a deconvolução estocástica ou preditiva. Esta etapa permite atenuar o principal efeito indesejado, as reflexões múltiplas, melhorando a resolução temporal dos traços.

A múltipla de fundo do mar é o alvo desse processamento. Por vezes é possível chegar a etapa de interpretação sem retirá-la, porém muitas vezes a múltipla encobre o sinal sísmico desejado, sendo necessária a sua atenuação. A deconvolução preditiva compara a repetição de eventos por quatro variáveis: início e fim da autocorrelação (*autocorrel. start*; *autocorrel. end* (ms)), comprimento da janela do filtro (*filter length*) e intervalo de predição da múltipla (*lag*).

Os parâmetros de início e fim de autocorrelação correspondem ao pouco tempo depois do tempo zero e um pouco antes do tempo final do registro, respectivamente. O tempo de registro

(perfil 16) é de 104 ms, então utilizou-se para o filtro o tempo inicial 5 ms (ou a partir da batimetria – 32 ms) e o final 100 ms. O comprimento do operador do filtro foi escolhido entre 60 e 50, pois a primeira múltipla ocorre num intervalo de 46 ms (não pode ser inferior ao intervalo de autocorrelação). O último parâmetro *lag* refere-se ao tempo de predição da múltipla, a qual se iniciou em 40 ms (pouco menor que o intervalo da múltipla) (Fig. 11).

O valor do *lag* representa no início da remoção do sinal múltiplo dentro da janela do filtro, portanto se observa que quando esse valor é inferior a dois terços do comprimento do filtro, tende-se a retirar o sinal acima da múltipla, quando é superior tende a retirar abaixo da múltipla, dependendo do tempo máximo onde ocorrem as repetições.

Ainda existem muitas dificuldades no processo de remoção/atenuação das múltiplas em dados de sísmica rasa, muitas vezes a deconvolução não consegue atenuar as múltiplas. Em dados com múltiplas de fortes amplitudes, ou de menor amplitude entre outras múltiplas, sugere-se a aplicação sistemática de janelas de deconvolução, correções de atenuação e de espalhamento geométrico.

Interpretação da seção sísmica

As informações geológicas contidas no dado de alta resolução são expressas em diferenças de amplitudes, zonas saturadas de

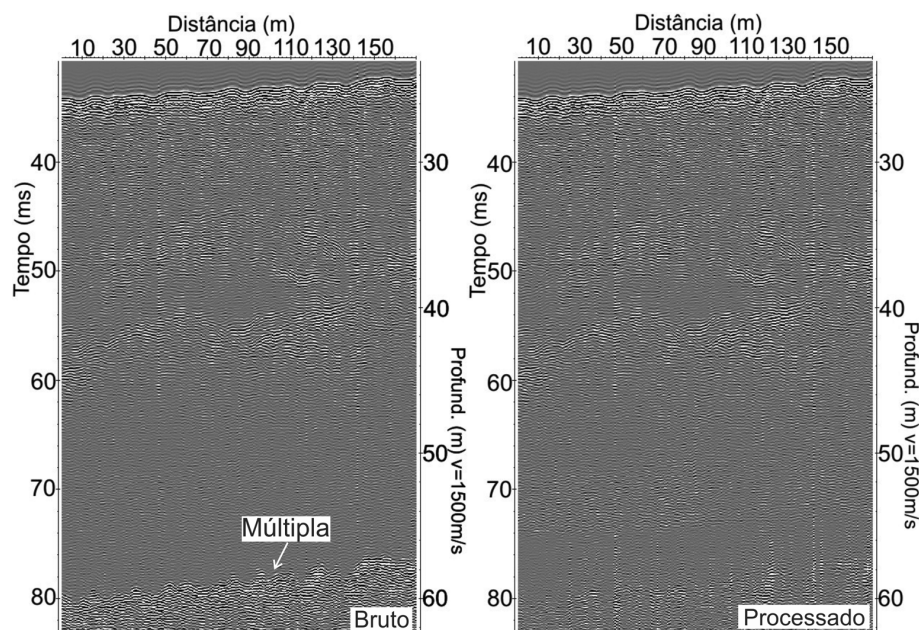


Figura 11 – Atenuação da múltipla de fundo do mar através da deconvolução preditiva.

altas ou baixas frequências, posições geométricas entre refletores, dentre outras que podem estar mascaradas pela presença de ruídos, e dificilmente o processamento conseguirá eliminar todos os efeitos indesejados em um dado de sísmica de alta resolução. No entanto, os métodos de sísmica rasa vêm implementar a aplicação da estratigrafia de sequência e da sismoestratigrafia na interpretação geológica rasa de subsuperfície, através de uma escala de tempo menor e mais recente na coluna cronoestratigráfica.

A confirmação da existência de um vale inciso pode ser feita através da identificação das discordâncias erosivas (e.g. Schwarzer et al., 2006; Vital et al., 2008, 2010). A estimativa total de erosão, assim como fases de erosão, disparidades entre fácies entre o preenchimento e a borda do canal, e diferenças no interior do canal, assim como feições geomorfológicas fluviais, podem ser quantificadas e interpretadas através da perfilação sísmica. Certamente a busca por evidências, que corroborem com a descrição da gênese do paleovale, podem correlacionar a feição com variações eustáticas e/ou neotectônica.

As interpretações neste presente trabalho limitam-se ao mapeamento do primeiro refletor fortemente marcado que indica um horizonte de superfície basal (superfície de erosão ou não deposição) do vale inciso durante o nível do mar baixo (Fig. 12) e as superfícies estratais encontradas preenchendo o canal (níveis de acamamento).

Na área de estudo os dados de sísmica rasa mostram um

horizonte na base do vale com truncamento de estratos que se estende regionalmente. Pode-se considerar seu embasamento acústico e margens como uma superfície erosiva (ou hiato) que se correlaciona a uma incisão pleistocênica ou holocênica com forte influência neotectônica. A partir da análise e interpretações sismoestratigráficas foi observado que o preenchimento reflete padrões de sismo fácies na base de depósitos mais proximais para mais distais no topo acompanhando a transgressão marinha. A Figura 12 apresenta o horizonte do embasamento acústico, provavelmente constituído por formações arenosas correlacionáveis à Formação Tibau ou Barreiras, com morfologia bastante irregular, e o preenchimento, que se estende até a superfície, constituindo uma unidade com transparência acústica, provavelmente predominantemente lamosa.

O dado submetido ao fluxo proporcionou uma melhor interpretação das seções de sísmica rasa as quais se basearam nos princípios sismoestratigráficos (Vail, 1987) e na correlação com dados sonográficos, imagens de satélite e sedimentológicos (Schwarzer et al., 2006; Gomes et al., 2007, 2008; Vital et al., 2005, 2008, 2010), onde foram destacados nas seções interpretadas efeitos comuns observados na área: gás espalhado interrompendo a estratificação, gás confinado ressaltando um refletor, transparência acústica em argila ou gás, padrão de corais, areia, afloramento rochosos (*beachrocks*), clinofomas, padrões de terminações de refletores, discordâncias erosivas, paleocanais, dentre outros.

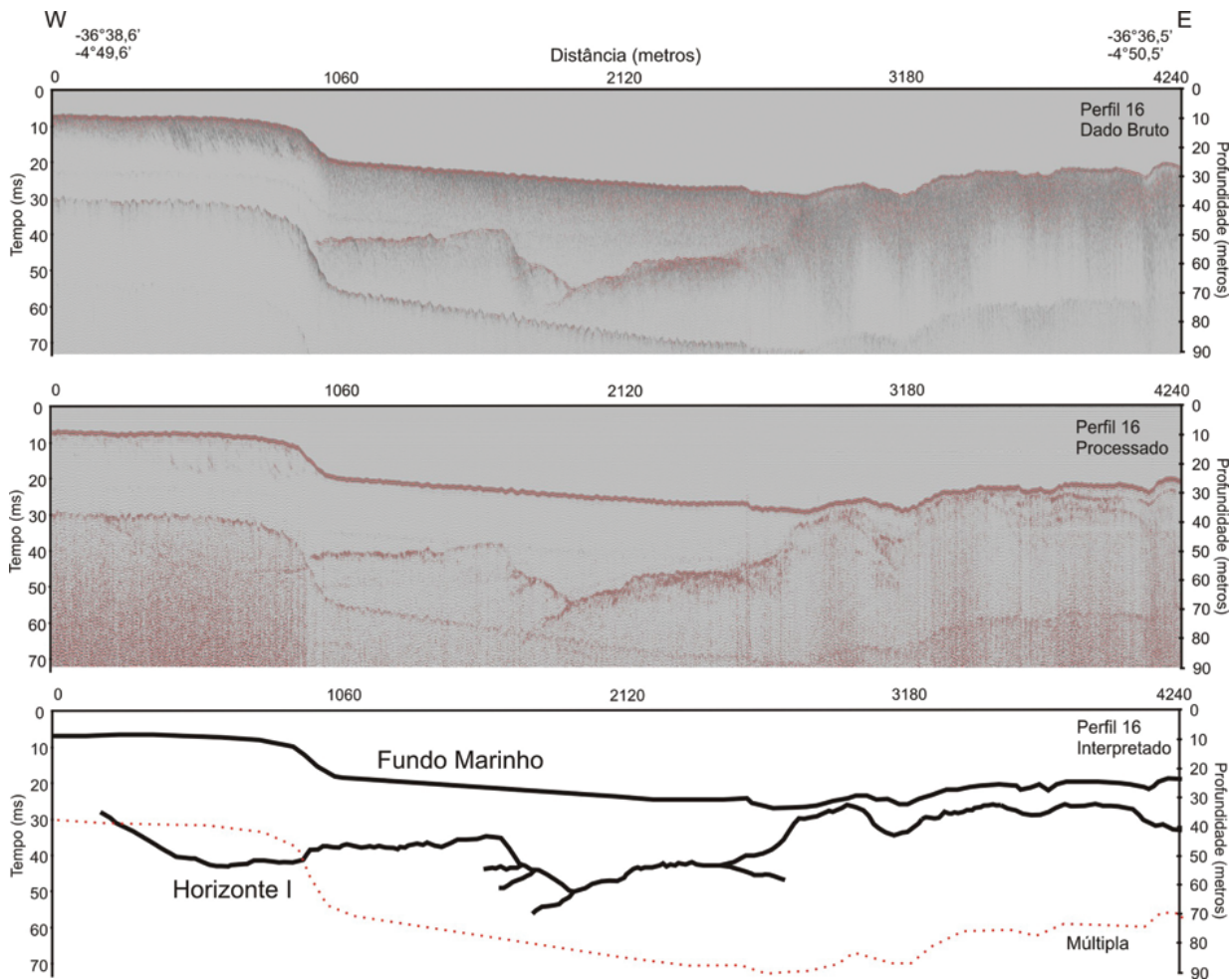


Figura 12 – Comparação entre a seção do dado bruto e o dado processado, onde é observada a remoção de ruídos de frequência, correção de amplitudes e a atenuação da múltipla, que permitiu a visualização da seção com a interpretação do Horizonte I.

CONCLUSÕES

A aplicação prática do fluxograma de processamento proposto nesse trabalho a dados de sísmica de alta resolução adquiridos no ambiente marinho da Plataforma Continental do RN (área: Macau) mostrou que:

- A análise dos espectros de amplitude, frequência e tempo forneceu parâmetros para a aplicação de ganhos e filtros. Esses parâmetros permitem a filtragem de ruídos, especialmente nos primeiros sinais de registro do traço sísmico, otimizando consideravelmente a visualização da seção sísmica em regiões afetadas por efeitos como o de gás, perda de amplitude com a profundidade e as interferências das baixas e altas frequências nas interfaces.
- Ainda existem dificuldades na retirada total das múltiplas,

ruídos de alta frequência e na compensação das perdas de amplitude vertical e horizontal. Por vezes pode-se obter uma ótima filtragem dos ruídos, porém muitos efeitos (como as múltiplas) resistem aos tratamentos e forçam a perda de sinal.

- Em toda a abrangência de profundidades alcançadas pelo método de sísmica rasa podem ser observadas as múltiplas limitando/impedindo a visualização da seção sísmica. Nesse trabalho a atenuação das múltiplas através da deconvolução mostrou-se eficiente/útil onde a amplitude do sinal pode ser compensada pela aplicação de ganhos e filtros.
- A análise de velocidades pode ser incluída nesse fluxo de processamento, auxiliando a atenuação das difrações e proporcionando uma maior distinção dos refletores e suas

profundidades reais. A velocidade do meio pode ser determinada pelas hipérbolas, que são formadas pela energia espalhada na posição do ponto espalhador (difrador). Entretanto a perfeita identificação de hipérbolas (que fornece a velocidade), nesse tipo de dado, pode se tornar uma tarefa pouco criteriosa ou subjetiva.

- A ordem de aplicação dos procedimentos desse fluxo de processamento tem sentido amplo de aplicação para a preservação das informações ambientais dos dados de sísmica rasa. O fluxo é aberto, podendo ter sua organização alterada pelo incremento ou remoção de etapas, porém as principais etapas, ferramentas e parâmetros testados nesse trabalho promoveram um melhor resultado ao tipo de dado utilizado.

Atualmente o processamento de dados de sísmica rasa ainda não é comumente aplicado, devido à qualidade do dado de alta resolução e a significativa quantidade de informação sísmica fornecido pelo dado bruto. Entretanto, para trabalhos que requerem um maior detalhe das feições mapeadas, o processamento do dado promove resultados superiores ao dado bruto, como demonstrado neste trabalho (Fig. 12).

Espera-se no futuro aprimorar o fluxo de processamento abrangendo dados de outros perfiladores sísmicos de alta resolução como, por exemplo, o *Boomer* e *Sparker*, principalmente no que diz respeito à compensação das perdas de amplitude e retirada das múltiplas, em que consistem os mais importantes passos na etapa de processamento, para que se obtenha efetivamente uma imagem de alta resolução de subsuperfície.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos ao Geofísico Pedro Xavier Neto (PETROBRAS UO-RNCE) pela colaboração na aplicação das ferramentas de processamento; a ANP-PRH22 pela bolsa de mestrado e ao CNPq pela bolsa de pesquisa respectivamente ao primeiro e segundo autor; a tripulação do navio balizador Cmt. Manhães (Marinha do Brasil, Serviço de Sinalização Náutica do Nordeste-SSN3) e equipe do GGEMMA pela ajuda durante o levantamento de dados em campo; e finalmente aos revisores anônimos, que colaboraram para melhorar a qualidade deste artigo. Esta pesquisa foi realizada com suporte financeiro dos projetos SISPLAT e POTMAR (REDE 05 FINEP-CTPETRO-PETROBRAS-Marinha do Brasil) e auxílio com bolsa de produtividade em pesquisa (PQ-CNPq) número 303481/2009-9.

REFERÊNCIAS

- BRUNETTA R. 2005. O processamento da sísmica de reflexão rasa – desafios encontrados no estudo de modelos análogos a reservatórios fraturados. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 85 p.
- CLAERBOUT JF. 1975. Spectral balancing. Stanford Exploration Project, 7: 172–182.
- COSTA AC. 2004. Fluxo de Processamento através do Pacote CWP/SU para Imageamento Sísmico de Alta Resolução. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Exploração e Produção do Petróleo). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé-RJ, 84 p.
- GADALLAH MR. 1994. Reservoir Seismology – Geophysics in Nontechnical Language. Publisher: Pennwell Corp, Tulsa, 369 pp.
- GOMES MP & VITAL H. 2008. Underwater Acquisition and Processing of High Resolution Data Seismic in Modern Continental Shelf of Potiguar Basin, Atlantic Margin of Northeast Brazil. In: International Geological Correlation Program Project No. 526 Risks, Resources, and Record of the Past on the Continental Shelf-Mining Late Quaternary Geological Evidence – 2nd Annual Conference, Natal. Anais... IGCP 526, 2008. p. 45.
- GOMES MP & VITAL H. 2010. Revisão da Compartimentação Geomorfológica da Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. Revista Brasileira Geociências, 40(3): 321–329.
- GOMES MP, VITAL H & MACEDO JWP. 2007. Aplicação da Geoestatística na Filtragem de Dados Batimétricos e Altimétricos na Bacia Potiguar. Revista de Geologia, 20: 243–255.
- GOMES MP, VITAL H, MACEDO JW & FRAZÃO EP. 2008. Incised Valley System: Insights from High-Resolution Seismic Stratigraphy and Geomorphologic Modeling from the Açú River Mouth and Shelf, Potiguar Basin, NE Brazil. In: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2008, San Antonio. Abstracts, p. 69.
- HOULDING SW. 1994. 3-D Geoscience Modeling Computer Techniques for Geological Characterization. Springer-Verlag, Berlin, 309 pp.
- PESSOA NETO OC. 2003. Estratigrafia de seqüências da plataforma mista neogênica Bacia Potiguar, Margem Equatorial Brasileira. Revista Brasileira de Geociências, 33(3): 263–278.
- ROBINSON EA & TREITEL S. 1980. Geophysical Signal Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 466 pp.
- SCHWARZER K, STATTEGGER K, VITAL H & BECKER M. 2006. Holocene Coastal Evolution of the rio Açú area (Rio Grande do Norte, Brazil). Journal of Coastal Research, SI 39: 140–144.
- SIECK H & SIEF GW. 1977. Analysis of high resolution seismic data. In: PAYTON CE (Ed.). Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 26: 353–385.

- VAIL PR. 1987. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure. In: BALLY AW (Ed.). Atlas of Seismic Stratigraphy. vol.1, AAPG Studies in Geology, 27: 1–10.
- VITAL H, SILVEIRA IM & AMARO VE. 2005. Carta Sedimentológica da Plataforma Continental Brasileira – Área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando Integração de Dados Geológicos e Sensoriamento Remoto. Revista Brasileira de Geofísica. SBGf, 23(3): 233–241.
- VITAL H, STATTEGGER K, AMARO VE, SCHWARZER K, FRAZÃO EP, TABOSA WF & SILVEIRA IM. 2008. A Modern High-Energy Siliciclastic-Carbonate Platform: Continental Shelf Adjacent to Northern Rio Grande do Norte State, NE Brazil. In: HAMPSON GJ, STEEL RJ, BURGESS PM & DALRYMPLE RW (Eds.). Recent advances in models of siliciclastic shallow-marine stratigraphy. SEPM, Special Publication, 90: 177–190.
- VITAL H, GOMES MP, TABOSA WF, FRAZÃO EP, SANTOS CLA & PLÁCIDO Jr JS. 2010. Characterization of the Brazilian Continental Shelf Adjacent to Rio Grande do Norte State, NE Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, Special Issue IGCP 526, 58: 43–54.
- YILMAZ O. 1987. Seismic Data Processing. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, Oklahoma, 526 pp.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Moab Praxedes Gomes. Geólogo (2007) e Mestre em Geodinâmica e Geofísica-PPGG (2009) pela UFRN. Atualmente (2009-2012) desenvolvendo tese de doutorado na área de Geologia e Geofísica Marinha na UFRN (PPGG) com estágio sanduiche na Universidade Christian Albrecht zu Kiel, Alemanha.

Helenice Vital. Geóloga pela UFRN (1986), Mestre em Geologia Marinha e Ambiental pela UFPA (1988) e Doutora em Geologia e Geofísica Marinha pela Universidade Christian Albrecht zu Kiel, Alemanha (1996). Professora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte desde 1997 onde desenvolve projetos de ensino, pesquisa e extensão na área de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental. Pesquisadora do CNPq.

José Wilson de Paiva Macedo. Físico pela Universidade de São Paulo (1970), Especialista em Geofísica pela Université Louis Pasteur (1978) e Doutor em Geofísica pela Université de Strasbourg I (1982). Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Atuando nos seguintes temas: Geofísica Aplicada, Sondagem Elétrica e Água Subterrânea.