



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA



GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

FILTRAGEM DE EVENTOS LINEARES NOS DADOS SÍSMICOS UTILIZANDO DERIVADA DIRECIONAL BIDIMENSIONAL

VINÍCIUS QUEIROZ DE OLIVEIRA

SALVADOR – BAHIA

JUNHO – 2009



Filtragem de eventos lineares nos dados sísmicos utilizando derivada direcional
bidimensional

por

VINÍCIUS QUEIROZ DE OLIVEIRA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

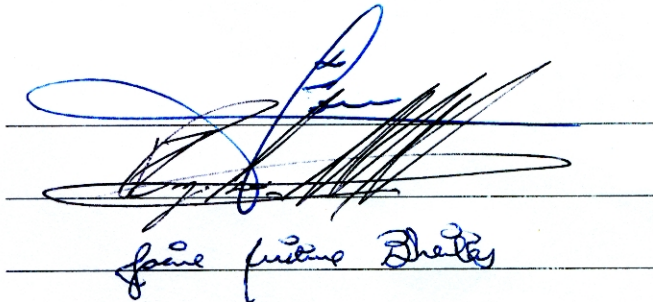
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



The image shows three handwritten signatures in blue ink, each placed over a horizontal line. The signatures are stylized and cursive. The first signature is the most prominent, followed by the second, and then the third, which appears to be a name written in a more legible script.

Comissão Examinadora

Dr. Milton José Porsani - Orientador

Dr. Paulo Espinheira Menezes de Melo

Dr. Jacira Cristina Batista de Freitas

Data da aprovação: 03/07/2009

À minha família e amigos, os quais
tenho uma especial adimiração.

RESUMO

Ruídos lineares são bastante comuns nos dados sísmicos adquiridos e representam um sério problema para o seu processamento. Prejudicam tanto a qualidade final das seções sísmicas, quanto sua interpretação. A eliminação ou atenuação desses ruídos é geralmente realizada através de métodos de filtragem ditos convencionais, que utilizam filtros de frequência 1D ou 2D. A tentativa de atenuação utilizando filtros de frequência, muitas vezes é pouco efetiva, pois normalmente os espectros de frequência do ruído e do sinal possuem certo recobrimento. No presente trabalho, testamos um novo método, recentemente desenvolvido no LAGEP-CPGG, que utiliza um operador 2D de derivada direcional. Os coeficientes do operador 2D são obtidos através do método de interpolação de Shepard, baseado no inverso da distância. A derivada, no ponto central do operador, é obtida utilizando-se a diferença entre os valores interpolados na vizinhança positiva e negativa, ao longo da direção do evento linear que se deseja atenuar. Esse operador é aplicado, mediante convolução 2D, sobre a matriz de dados correspondente à família de traços. Exemplos numéricos utilizando dados sintéticos com eventos lineares e dados sísmicos reais ilustram a eficácia do método. O método de filtragem direcional foi utilizado na atenuação do *ground-roll* de uma linha sísmica da Bacia do Tacutu. Esse tipo de ruído é característico de aquisições terrestres e apresenta alta amplitude em relação às reflexões. O método também foi aplicado em uma linha sísmica do *Grane Field* (Mar do Norte) com o objetivo de filtrar eventos lineares conhecidos como *head waves* e *harmonic modes*, típicos de regiões marinhas com lâmina d'água rasa e aquisições feitas com longos *offsets*. Tanto nos dados terrestres, quanto nos dados marinhos, o método de filtragem direcional 2D atuou de forma bastante eficaz, atenuando os ruídos e colocando em evidência as reflexões subjacentes. O método de filtragem direcional bidimensional mostrou-se mais eficaz e apresentou melhores resultados, quando comparado com os resultados obtidos com a filtragem no domínio da frequência.

ABSTRACT

Linear noises are commonly found in the acquired seismic data and represent a serious problem for data processing. They hinder both the final quality of the seismic sections, and their interpretation. The elimination or attenuation of these noises generally is carried through filtering methods considered conventional that use 1D or 2D frequency filters. The attenuation attempt using frequency filters is many times not so effective, since normally the spectra of noise frequency and the signal coincide partially. In the present work, we test a new method, recently developed in the LAGEP-CPGG that uses a 2D filtering operator of directional derivative. The coefficients of the 2D filtering operator are obtained through the Shepard interpolation method, which are computed based on the inverse of the distance. The derivative at the operator central point is obtained by using the difference between the interpolated values in the positive and negative neighborhood, along the direction of the linear event to be attenuated. Such operator is applied by means of a 2D convolution over the matrix of data corresponding to the family of traces. Numerical examples using synthetic data with linear events and real seismic data illustrate the effectiveness of the method. The method of directional filtering was used in the attenuation of the ground-roll of a seismic line from the Tacutu sedimentary basin. This type of noise is typical of land acquisitions and presents high amplitude as regards the reflections. The method was also applied to a seismic line of Grane Field (Northern Sea) with the objective of filtering linear events known as head waves and harmonic modes, typical of marine regions in shallow surfaces and acquisitions made with long offsets. Both in the terrestrial data, and in marine data the 2D directional filtering method was effective, attenuating noises and putting in evidence the subjacent reflections. The bi-dimensional directional filtering method revealed more efficient and presented better results when compared to the results obtained with the filtering in the frequency domain.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Ruídos com características lineares	3
1.1 Ruídos terrestre	3
1.1.1 <i>Ground roll</i>	3
1.2 Ruídos marinho	5
1.2.1 Head Waves	5
1.2.2 Harmonic Modes	8
CAPÍTULO 2 Métodos de filtragem	10
2.1 Filtragem passa-alta unidimensional	10
2.2 Filtragem passa-banda bidimensional (f-k)	13
2.3 Filtragem direcional 2D no domínio do tiro	16
2.3.1 Obtenção do filtro de derivada direcional	16
CAPÍTULO 3 Resultados Obtidos	20
3.1 Aplicação da filtragem direcional 2D em dados sintéticos	20
3.2 Processamento da linha 204-RL-247 da bacia do Tacutu	26
3.2.1 Descrição dos dados	26
3.2.2 Pré-processamento	27
3.2.3 Utilização do filtro passa-alta	31
3.2.4 Utilização do filtro f-k	35
3.2.5 Utilização do filtro 2D de derivada direcional	38
3.3 Processamento da linha L5120 de um cubo sísmico da região do <i>Grane Field</i> (Mar do Norte)	43
3.3.1 Descrição dos dados	43
3.3.2 Processamento da linha L5120	45

CONCLUSÕES	54
Agradecimentos	55
APÊNDICE A Dedução da equação 1.5	56
Referências Bibliográficas	58
ANEXO I Subrotina que horizontaliza eventos mergulhantes	59
ANEXO II Subrotina que retira o efeito de horizontalização nos eventos mergulhantes	62

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Comportamento das ondas Rayleigh na superfície terrestre.	4
1.2	Sismograma mostrando o efeito do <i>ground roll</i> em dados terrestre. O <i>ground roll</i> está delimitado pela região em azul.	5
1.3	Figura ilustrativa demonstrando o fenômeno da refração.	6
1.4	Sismograma demonstrando o efeito mascarador das <i>head waves</i> . A região delimitada pelo polígono azul é onde se encontra a maior parcela desse ruído.	7
1.5	Figura ilustrativa demonstrando o fenômeno das múltiplas reflexões.	8
1.6	Sismograma mostrando como se comportam os modos harmônicos. O ruído está limitado pelo polígono em azul.	9
2.1	Filtro passa-alta em (a), passa-banda em (b) e passa-baixa em (c).	10
2.2	Diagrama para a filtragem no domínio da frequência (Yilmaz, 2001).	12
2.3	Diagrama para a filtragem no domínio do tempo (Yilmaz, 2001).	12
2.4	Uma família de tiro comum (domínio t-x) contaminado com o <i>ground roll</i> em (a), em (b) o mesmo evento no domínio f-k.	14
2.5	Cálculo da transformada de Fourier 2D (Yilmaz, 2001).	15
2.6	Esquema de atuação de cada operador na matriz de dados (Melo, 2009).	17
2.7	Representação esquemática da atuação do operador $\mathbf{O}^5$ 3×3 . A derivada no ponto 5, tomada ao longo da direção $\mathbf{r}$, é obtida através da diferença entre os valores interpolados nas posições opostas $\mathbf{r}^+$ e $\mathbf{r}^-$. Notar que o valor de θ é função de $\mathbf{r}$	19
3.1	Tiro sintético bruto (6 Hz) em (a) e após a filtragem em (b).	21
3.2	Tiro sintético (15 Hz) bruto em (a) e após a filtragem em (b).	22
3.3	Tiro sintético (30 Hz) bruto em (a) e após a filtragem em (b).	22
3.4	Distância entre máximos de amplitude para os eventos lineares de 30 Hz.	23
3.5	Janela de atuação (em preto) do filtro para um tiro sintético de 10 Hz (a), 30 Hz (b) e para o evento de 30 Hz com horizontalização (c).	23
3.6	Tiro sintético bruto (30 Hz) em (a) e após a horizontalização em (b).	24
3.7	Tiro filtrado utilizando uma velocidade de 38000 m/s.	25
3.8	Tiro sintético bruto (30 Hz) em (a) e após a filtragem com o auxílio da horizontalização em (b).	25

3.9	<i>Super Gather</i> formado a partir de um intervalo de família CMP (100-300), mostrando o efeito do <i>ground roll</i> na linha da bacia do Tacutu. A região marcada com um cone é onde está situada o maior efeito contaminante do ruído.	27
3.10	Fluxograma de processamento utilizado na linha 204-RL-247 da bacia do Tacutu.	29
3.11	Seção empilhada sem a utilização de qualquer método de filtragem.	30
3.12	<i>Super Gather</i> formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) antes do processo de filtragem, em (a) e o espectro de velocidade em (b).	31
3.13	Região do <i>ground roll</i> destacada em verde, utilizada para a análise e definição do filtro passa-alta.	32
3.14	Região da reflexão destacada em verde, utilizada para a análise e definição do filtro passa-alta.	32
3.15	<i>Super Gather</i> formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) após o processo de filtragem com o filtro passa-alta, em (a) e o <i>semblance</i> em (b).	33
3.16	Seção empilhada com o método de filtragem passa-alta unidimensional.	34
3.17	Tiro 135 mostrando a representação dos dados no domínio f-k. A partir da análise dos dados nesse domínio é possível determinar a região de corte.	35
3.18	<i>Super Gather</i> formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) após o processo de filtragem f-k, com seu respectivo <i>semblance</i>	36
3.19	Seção empilhada com o método de filtragem f-k.	37
3.20	<i>Super Gather</i> formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) após o processo a filtragem direcional 2D, com seu respectivo <i>semblance</i>	38
3.21	Fluxograma utilizado no processamento com a filtragem direcional.	39
3.22	Seção empilhada com o novo método de filtragem com a derivada direcional.	40
3.23	Intervalo destacado da seção empilhada bruta (a), com filtragem passa-alta (b), com a utilização do filtro f-k e com filtragem direcional 2D (d).	42
3.24	Comparação dos espectros de frequência das seções empilhadas bruta e com a aplicação dos diferentes métodos de filtragem.	43
3.25	Mapa de profundidades com a localização da linha L5120. A linha interrompida indica a posição do <i>inline</i>	44
3.26	<i>Super Gather</i> mostrando as <i>head waves</i> em (a) e os <i>harmonic modes</i> em (b), ambos limitados pelo contorno em azul.	44
3.27	Figura demonstrando o espectro de amplitude para o <i>head wave</i> em (a), e para o <i>harmonic modes</i> em (b).	45
3.28	Cmp 100 mostrando o efeito da aplicação do filtro f-k nos dados. Em (a) temos os dados brutos e em (b) após a filtragem com o f-k.	46
3.29	Cmp 100 mostrando o efeito da aplicação da derivada direcional 2D nos dados. Em (a) temos os dados brutos e em (b) após a filtragem.	47

3.30	Figura mostrando os <i>harmonic modes</i> no cmp 100 antes da horizontalização em (a) e após em (b).	48
3.31	Cmp 100 bruto em (a) e após a filtragem com o processo de horizontalização dos <i>harmonic modes</i> em (b).	48
3.32	Cmp 100 bruto em (a) e após a filtragem com o processo de horizontalização das <i>head waves</i> em (b).	49
3.33	Seção empilhada bruta.	50
3.34	Seção empilhada com a filtragem f-k.	51
3.35	Seção empilhada utilizando o novo método de filtragem de derivada direcional com o auxílio do processo de horizontalização.	52
3.36	Seção empilhada com ampliação utilizando a filtragem f-k em (a), e com a derivada direcional em (b).	53

INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão vem sendo largamente usada pela indústria do petróleo durante a etapa de exploração de hidrocarbonetos, com o intuito de mapear em subsuperfície regiões promissoras à produção de petróleo. A obtenção da imagem sísmica a partir dos dados adquiridos requer a aplicação de vários métodos de filtragem que têm por objetivo aumentar a razão Sinal/Ruído e melhorar a resolução e qualidade dos dados. A boa definição de estruturas armazenadoras de óleo e gás depende diretamente da resolução do traço sísmico, que por sua vez são registrados com diversos ruídos.

É de interesse para a indústria do petróleo a atenuação de qualquer ruído para melhorar a razão sinal/ruído dos sismogramas.

Os filtros de frequência passa-alta e o f-k, ditos convencionais, são largamente utilizados na indústria petrolífera para a remoção desses ruídos, estes nem sempre fornecem bons resultados, pois trabalham no domínio da frequência e muitas vezes os espectros do sinal e do ruído se superpõem, ficando difícil determinar uma faixa de frequência a ser eliminada (Santos, 2007; Melo et al., 2009; Porsani et al., 2007).

Os ruídos que são observados nos sismogramas e que apresentam certa regularidade traço a traço, são classificados como ruídos coerentes. Dentre esses, merece destaque o chamado *ground roll*, cuja origem está ligada à componente vertical das ondas *Rayleigh* e encontra-se comumente presente nos dados sísmicos terrestres.

O *ground roll* representa um grande desafio durante o processamento, alguns autores mostraram que o mesmo pode ser atenuado durante a aquisição, para isso é necessário que a fonte e o receptor sejam arrançados de forma especial (Anstey, 1986; Pritchett, 1991). A estratégia de configuração peculiar entre a fonte e o receptor pode ser inviável logisticamente (Newman e Mahoney, 1973), além de não ser possível a realização desse método em dados anteriormente adquiridos. Vários métodos alternativos vêm sendo desenvolvidos na tentativa de remover ou atenuar esse ruído (Meersman e Ansorger, 2007).

Existem outros ruídos coerentes e lineares que podem ser encontrados em dados marinhos, merecem destaques as *head waves* e os *harmonic modes* (Landro, 2007; Press and Ewing, 1950). As *head waves* estão associadas as refrações com ângulo crítico que ocorre no assoalho oceânico e em subsuperfície (Landro, 2007). Os *harmonic modes* estão associados às múltiplas reflexões que ocorrem no interior da lâmina d'água (Landro, 2007). Ambos ruídos podem ser tratados através do filtro f-k entretanto os resultados obtidos não são totalmente

satisfatórios.

Neste trabalho testamos um novo método para a atenuação de eventos lineares, que utiliza um operador 2D para a obtenção da derivada direcional. O operador 2D de filtragem direcional é aplicado diretamente sobre os sismogramas, seguindo uma abordagem diferente daquela apresentada por Melo et al., 2009, na qual os sismogramas são corrigidos de NMO antes da filtragem. A filtragem dos eventos é obtida através da convolução do operador 2D de derivada, com o sismograma dos dados originais, onde o principal parâmetro de entrada é a velocidade do evento linear a ser retirado. A operação de derivada tem a função de atenuar as amplitudes coerentes na direção de atuação do filtro.

O método foi aplicado em dados sintéticos e dados reais. Entre os dados reais selecionamos duas linhas, uma do Tacutu e a outra do *Grane Field*. A linha do Tacutu encontra-se fortemente contaminada pelo *ground roll* e a do *Grane Field* fortemente contaminada com as *head waves* e com os *harmonic modes*. Utilizamos o mesmo fluxograma para os diferentes métodos de filtragem testado, afim de obter resultados diferenciados apenas pelo método de filtragem utilizado.

CAPÍTULO 1

Ruídos com características lineares

Na sismica de reflexão os principais eventos de interesse são as reflexões primárias ocorridas em subsuperfície. Tais reflexões podem ser mascaradas por outros eventos indesejáveis, os quais são conhecidos de uma maneira genérica como ruídos.

Os ruídos podem ser classificados como aleatórios ou coerentes. Os ruídos aleatórios tem como característica a não regularidade, ou seja, não existe padrão de repetição, tornando difícil identificá-los durante o processamento dos dados. Sons advindos de ambientes barulhentos, motores de embarcações, etc... são exemplos de eventos aleatórios que prejudicam a razão sinal/ruído no sismograma.

Os ruídos coerentes, por sua vez, são passíveis de identificação traço a traço, exibindo um comportamento regular nos sismogramas. Podemos citar eventos múltiplos, ondas de refração, ondas diretas, *head waves*, *hamornic modes* e ondas de rolamento superficial, também conhecido como *ground roll*.

1.1 Ruídos terrestre

Nas aquisições terrestres os típicos ruídos encontrados tem, na maioria das vezes, características lineares, dentre eles merecem destaque as ondas diretas, refratadas e o *ground roll*. Os dois primeiros são comumente atenuados ou removidos nas primeiras etapas do processamento com um *top mute*, que visa zerar todas as amplitudes de uma região, porém o terceiro representa um grande problema, pois o mesmo se superpõem as reflexões primárias devendo ter um tratamento diferenciado.

1.1.1 *Ground roll*

As ondas superficiais do tipo *Rayleigh* (Lord Rayleigh¹) é a origem mais aceita do *ground roll* nos nas seções sísmicas terrestres.

¹matemático e físico inglês que predisse matematicamente a existência desse tipo de onda em 1985.

As ondas Rayleigh tem a amplitude fortemente atenuada com o aumento da profundidade, existindo na região mais superficial da superfície terrestre. Elas apresentam um movimento tanto paralelo à direção de propagação quanto perpendicular (no plano vertical), e estão em fase, fazendo com que o movimento seja geralmente elíptico - prógrado e retrógrado. A Figura 1.1 mostra o comportamento típico das ondas Rayleigh na superfície da Terra.

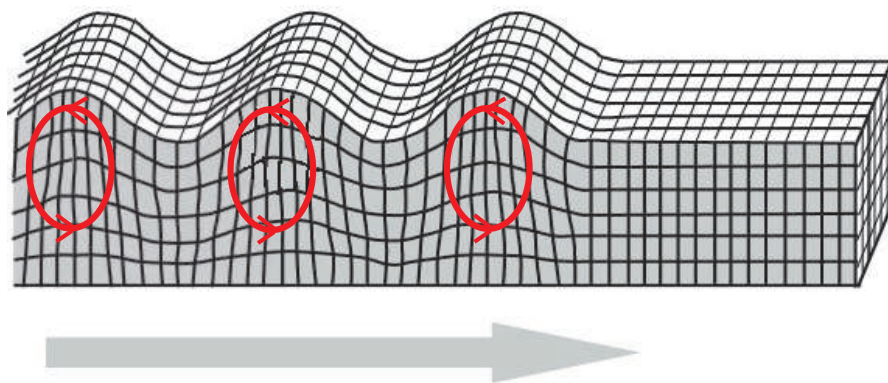


Figura 1.1: Comportamento das ondas Rayleigh na superfície terrestre.

Nas seções sísmicas o caráter cilindro do espalhamento geométrico do *ground roll* faz com que o decaimento em sua amplitude seja proporcional à $\frac{1}{\sqrt{r}}$, já nas ondas refletidas o decaimento é proporcional à $\frac{1}{r}$. Esses são alguns dos fatores que fazem com que o *ground roll* tenha a amplitude superior às reflexões, resultando em reflexões fortemente mascaradas na região de contaminação conforme mostra a Figura 1.2.

As principais características desse ruído são o seu comportamento linear nos sismogramas, baixas velocidades e altas amplitudes, concentrada nas baixas frequências (5 - 12 Hz). Em geral, a velocidade de propagação do *ground roll* está na faixa de 100 a 1.000 m/s e a frequência do mesmo inferior a dos eventos de refração e reflexão, por volta de 10 Hz (Telford et al., 1976).

A Figura 1.2 demonstra o efeito do *ground roll* em sismogramas de dados reais. Podemos concluir que esse evento mascara as reflexões primárias de interesse, prejudicando assim o imageamento em subsuperfície.

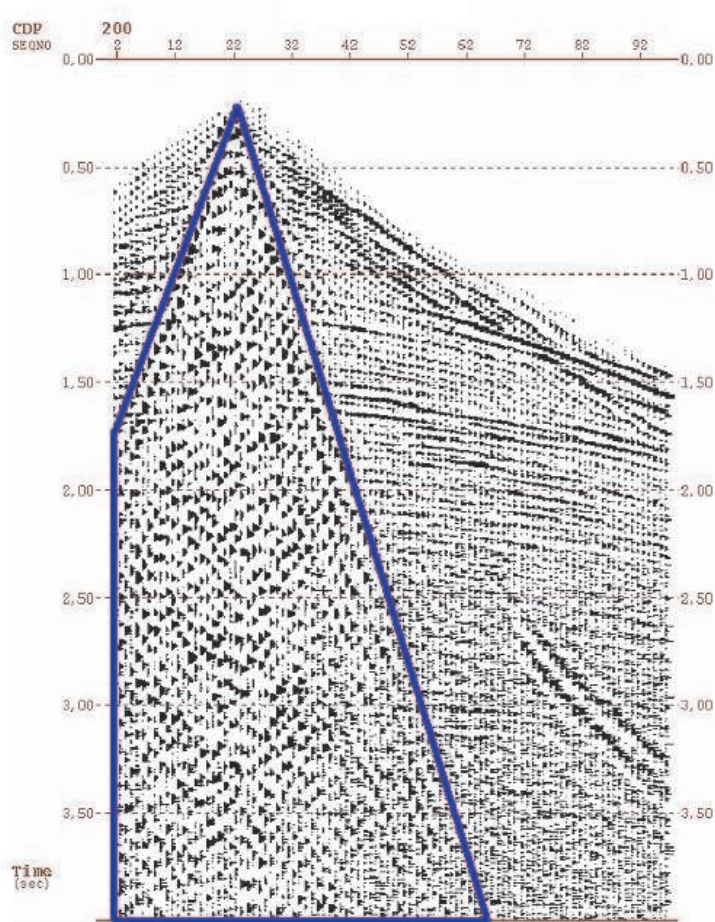


Figura 1.2: Sismograma mostrando o efeito do *ground roll* em dados terrestre. O *ground roll* está delimitado pela região em azul.

1.2 Ruídos marinho

Durante as aquisições marinhas eventos lineares podem ser detectados pelo receptor. Um dos eventos bastante conhecido é a onda direta, que normalmente fica na parte superior do sismograma e não interfere nas reflexões, exceto para lâminas d'água rasas, onde geralmente a onda direta intercepta as reflexões. Outros eventos conhecidos na aquisição marinha, para aquisições com longos *offsets* e lâmina d'água rasa, são os *harmonic modes* e as *head waves*, esses ruídos normalmente interfere nas reflexões em subsuperfície.

1.2.1 Head Waves

Head waves são as ondas produzidas através da refração total que ocorre na interface entre duas camadas quando o ângulo de incidência é crítico.

A Figura 1.3 ilustra uma frente de onda sofrendo o fenômeno de refração.

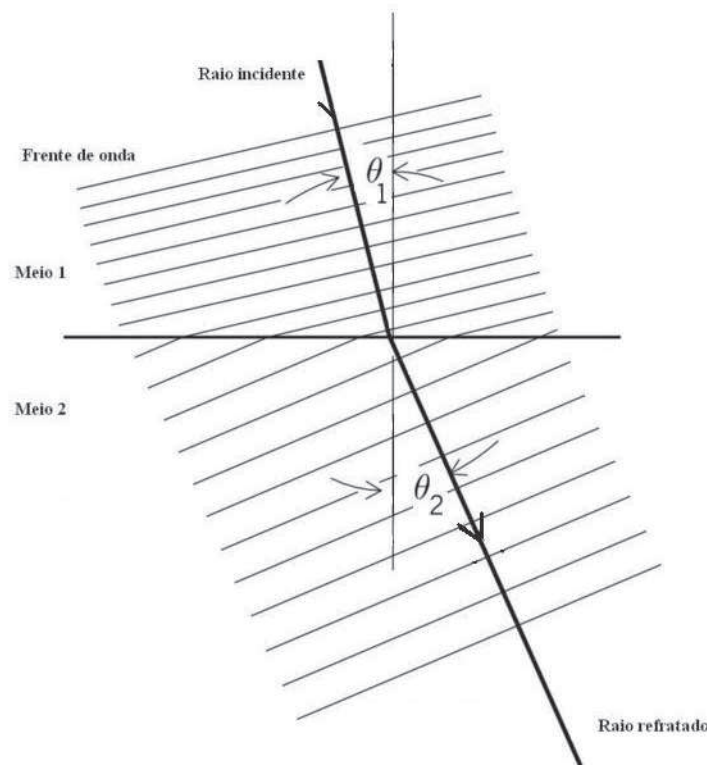


Figura 1.3: Figura ilustrativa demonstrando o fenômeno da refração.

A partir da Figura 1.3 podemos deduzir a seguinte relação

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2}, \quad (1.1)$$

onde θ_1 representa o ângulo do raio incidente da onda formado com a normal, e θ_2 representa o ângulo formado pelo raio da onda resultante da refração com a normal. A velocidade v_1 é relativo a camada superior, e v_2 da camada inferior.

Quando a velocidade do meio 2 é maior que a do meio 1 a onda refratada se afasta da normal. Este é o caso mais comum e daí ocorre a refração total no ângulo crítico θ_c .

Através da equação (1.1) e da condição que $\theta_2 = 90^\circ$ obtemos:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1.2)$$

Através da equação (1.2) concluímos que a condição necessária para que a onda refratada possa ter um ângulo de 90° em relação a normal, é que a velocidade do meio 1 seja menor em relação a do meio 2. Essas ondas refratadas se propagam na interface entre os meios com a velocidade da camada inferior (v_2) e são continuamente retransmitidas para a superfície.

Em situações geológicas onde o meio abaixo tem a velocidade maior que o meio acima e a onda sísmica gerada descenda com inclinação suficiente (longos *offsets*), essas ondas tornam-se possíveis de serem detectadas pelo receptor, e são chamadas de *head waves*.

A Figura 1.4 mostra o efeito das *head waves* num sismograma. É possível notar o caráter linear desse evento.

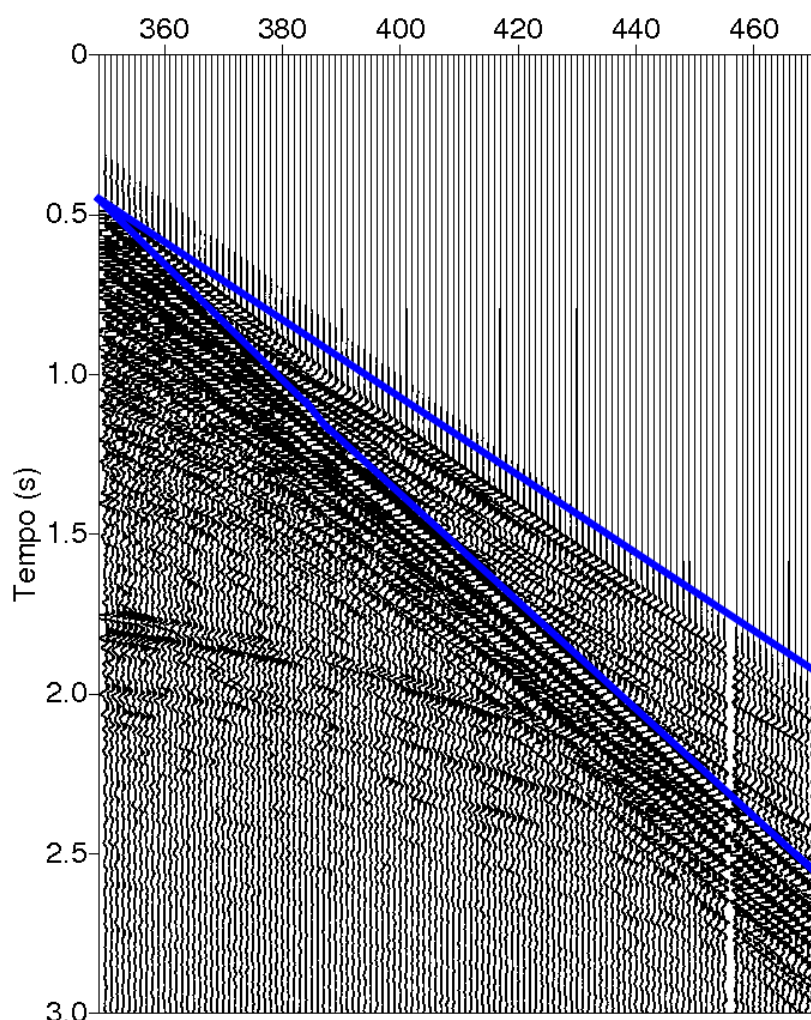


Figura 1.4: Sismograma demonstrando o efeito mascarador das *head waves*. A região delimitada pelo polígono azul é onde se encontra a maior parcela desse ruído.

1.2.2 Harmonic Modes

Os *harmonic modes* ou modos harmônicos são ondas originárias de múltiplas reflexões em lâmina d'água rasa, e com aquisições utilizando longos *offsets*. Uma discussão mais aprofundada sobre a origem desse fenômeno pode ser feita por Press e Ewing (1950).

A figura a seguir (Figura 1.5) ilustra a origem dos modos harmônicos.

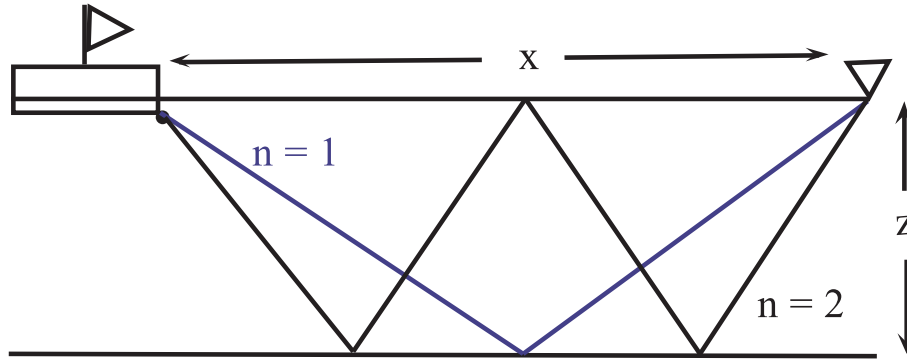


Figura 1.5: Figura ilustrativa demonstrando o fenômeno das múltiplas reflexões.

Podemos definir a distância d_n percorrida pelo harmônico de ordem n como:

$$d_n = \sqrt{x^2 + 4n^2z^2}, \quad (1.3)$$

onde x é a distância entre fonte-receptor e z a profundidade da lâmina d'água.

Para o campo de onda gerado por este tipo de evento teremos:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n \frac{(-1)^{n+1}}{d_n} p\left(t - \frac{d_n}{v}\right), \quad (1.4)$$

onde v é a velocidade do meio, p a wavelet da fonte e t o tempo de percurso da onda.

Se quisermos representar a equação (1.4) no domínio da frequência chegaremos a

$$S(w) = P(w) \sum_{i=1}^n \frac{(-1)^{n+1}}{d_n} e^{iw(d_n/v)}.$$

(1.5)

Se assumirmos que os modos harmônicos vizinhos na equação (1.5) tem maior contribuição que os demais, teremos:

$$f \propto \frac{vx}{4nz^2}. \quad (1.6)$$

A partir da equation 1.6 podemos perceber que o evento, para a condição de $x \gg nz$ (ver apêndice A), se comporta linearmente.

A Figura 1.6 destaca (em azul) os *harmonic modes* num sismograma.

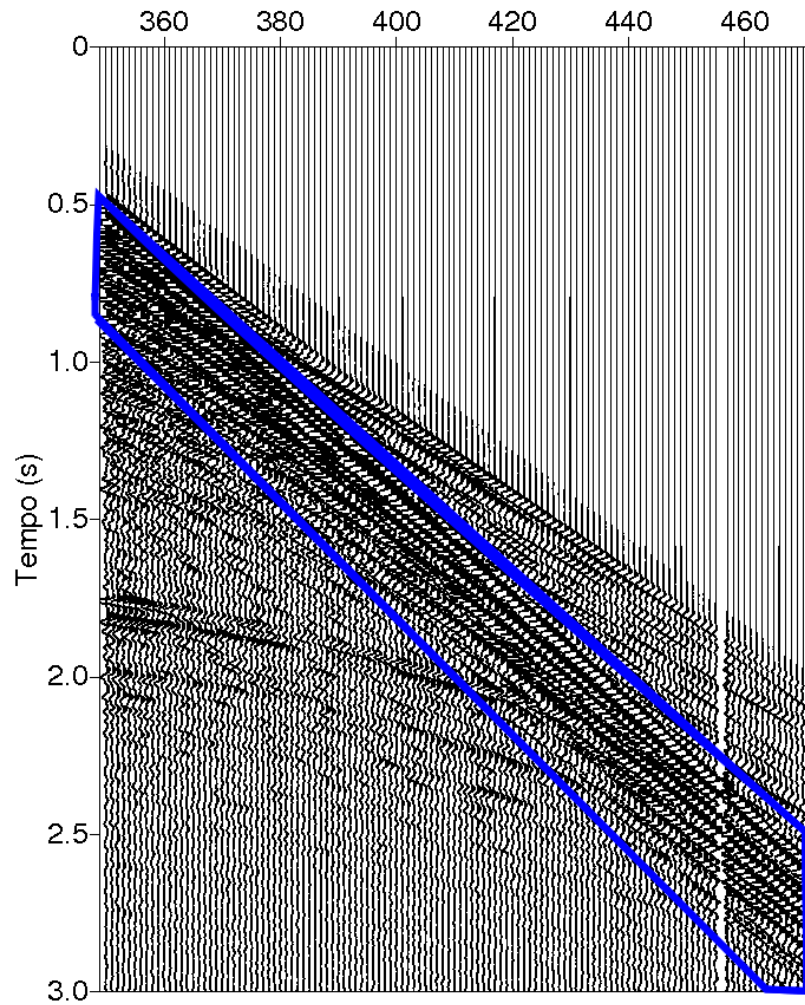


Figura 1.6: Sismograma mostrando como se comportam os modos harmônicos. O ruído está limitado pelo polígono em azul.

CAPÍTULO 2

Métodos de filtragem

2.1 Filtragem passa-alta unidimensional

As filtragens de frequência unidimensionais são utilizadas durante a fase do processamento para modificar o espectro de amplitude do sismograma. Ela pode ser utilizada num dado pré-empilhado ou pós-empilhado, tendo sempre a finalidade de remoção de uma faixa de frequência específica.

Existem vários tipos de filtros de frequência, entre eles podemos destacar o passa-alta, passa-baixa e o passa-banda. A Figura 2.1 esquematiza os três filtros anteriormente citados.

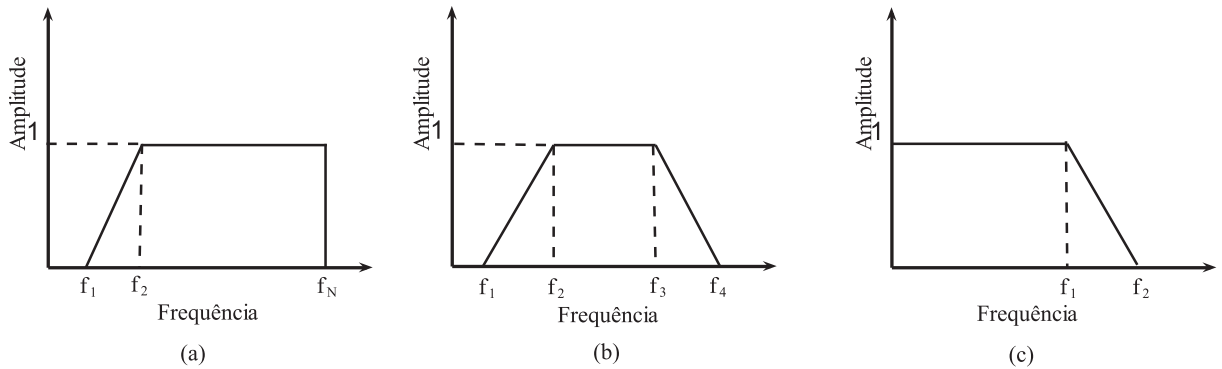


Figura 2.1: Filtro passa-alta em (a), passa-banda em (b) e passa-baixa em (c).

Através da Figura 2.1 podemos perceber que todos tem como princípio básico a preservação de somente uma determinada faixa de frequência convenientemente escolhida. O passa-alta fica limitado por uma frequência f_N chamada de frequência de Nyquist. A frequência de Nyquist é definida como a maior frequência possível de se reconstituir durante a amostragem das amplitudes em campo, sendo dada através da equação

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t}, \quad (2.1)$$

onde Δt representa o intervalo de amostragem.

A filtragem passa-alta é utilizada quando deseja-se eliminar somente baixas frequências, restando as altas frequências. Na fase de filtragem esse filtro é escolhido quando o ruído a ser atenuado está presente nas baixas frequência, esse é o caso específico do *ground roll*.

Uma *wavelet* (pulso sísmico) de fase zero com uma faixa de amplitude determinada, pode ser usada para filtrar um sismograma. A saída conterá somente aquelas frequências pertencentes a *wavelet* usada no filtro (Yilmaz, 2001). A representação no domínio do tempo do pulso é o operador do filtro. As amostras individuais no tempo desse operador são os coeficientes do filtro.

Esse processo apenas muda o espectro de frequência e não a fase (filtro de frequência de fase zero). No domínio da frequência a filtragem se processa através da multiplicação entre os espectros de amplitudes do filtro e o dado de entrada. No domínio do tempo convolvemos o operador do filtro com a matriz dos dados de entrada.

As filtrações no domínio do tempo e da frequência são justificadas pelo Teorema da Convolução que garante que: convolver no domínio do tempo é equivalente a multiplicar no domínio da frequência.

A mudança de domínio numa função é feita através da transformada de Fourier 1D. A integral que define a transformada direta de Fourier 1D para a função $f(t)$ continua é representada como

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iwt}dt, \quad (2.2)$$

onde $F(w)$ representa a função no domínio da frequência, t é o tempo e w a frequência angular ($w = 2\pi f$).

O processo de transformação é reversível, ou seja, através da função $F(w)$ é possível recuperar $f(t)$ com a integral.

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(w)e^{iwt}dw. \quad (2.3)$$

Sendo os dados amostrados de maneira discreta, devemos utilizar a transformada discreta de Fourier. Normalmente usa-se o algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) ou transformada rápida de Fourier.

A Figura 2.2 demonstra um esquema prático para a filtragem no domínio da frequência, sendo que a Figura 2.3 mostra o equivalente para o tempo.

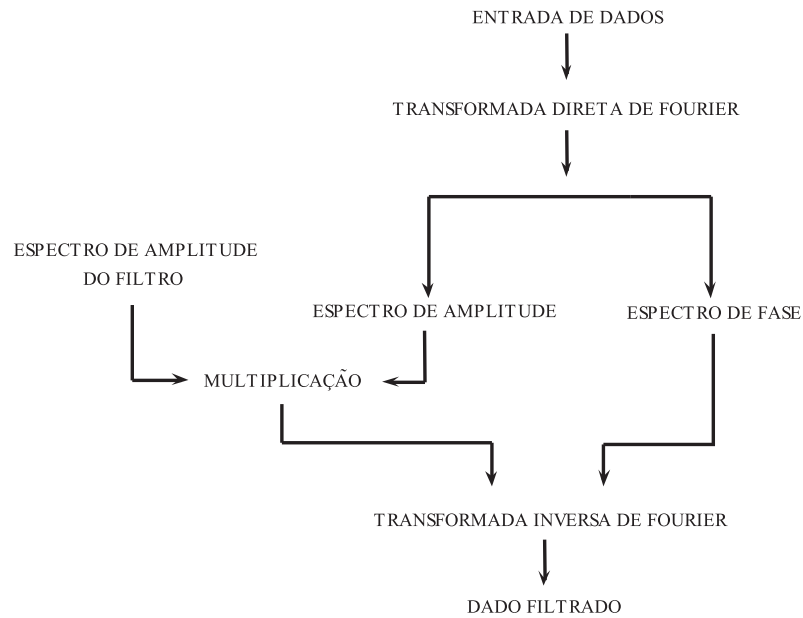


Figura 2.2: Diagrama para a filtragem no domínio da frequência (Yilmaz, 2001).

Com a filtragem no domínio da frequência e do tempo obtém-se resultados basicamente idênticos. A filtragem em tempo é mais favorável, uma vez que, a convolução tem um custo computacional menor que a transformada de fourier.

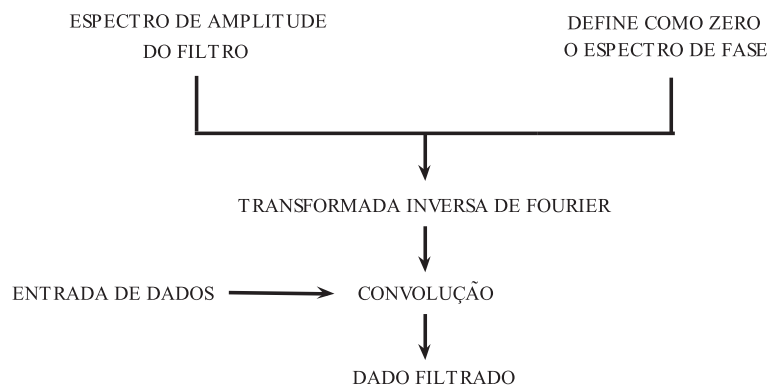


Figura 2.3: Diagrama para a filtragem no domínio do tempo (Yilmaz, 2001).

2.2 Filtragem passa-banda bidimensional (f-k)

Durante o processamento, um filtro largamente utilizado tanto para a retirada do *ground roll* quanto a de qualquer evento linear é o filtro passa-banda bidimensional ou filtro f-k. A filtragem f-k tem como princípio básico o mesmo que o filtro de frequência passa-banda unidimensional, onde o objetivo é zerar a amplitude dos ruídos numa faixa de frequência desejada. Para o filtro f-k, o objetivo é zerar as amplitudes dos ruídos para um par (f,k) (frequência-número de onda), ou seja, determina-se uma região para a aplicação do filtro bidimensional.

No domínio do tempo podemos definir a frequência temporal como o número de ciclos realizado pelo evento por unidade de tempo¹. Analogamente podemos definir a frequência espacial como o número de ciclos por unidade de distância², ou número de onda. Para definirmos o número de onda de um evento inclinado, devemos contar o número de picos (amplitudes máximas) em uma unidade de distância.

Há uma relação fundamental entre f e k para um evento mergulhante de velocidade constante. Por definição temos:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad e \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{logo,} \quad (2.4)$$

a partir de 2.4 temos

$$\frac{f}{k} = \frac{v}{2\pi} = \alpha \text{ (constante),} \quad (2.5)$$

onde λ é o comprimento de onda (em Km) e v é a velocidade aparente do evento (em Km/s).

Devido a relação linear entre f e k, eventos lineares no domínio t-x também serão mapeados linearmente no domínio f-k.

A Figura 2.4 representa em (a) o *ground roll* no domínio t-x e em (b) o mesmo no domínio f-k.

Como teorizado anteriormente o *ground roll* mantém sua característica linear no domínio f-k.

Equivalente a frequencial temporal de Nyquist definida na equação (2.1), fica definida a frequência espacial de Nyquist como

¹por conveniência adota-se o segundo como unidade padrão

²adota-se o quilômetro como unidade padrão

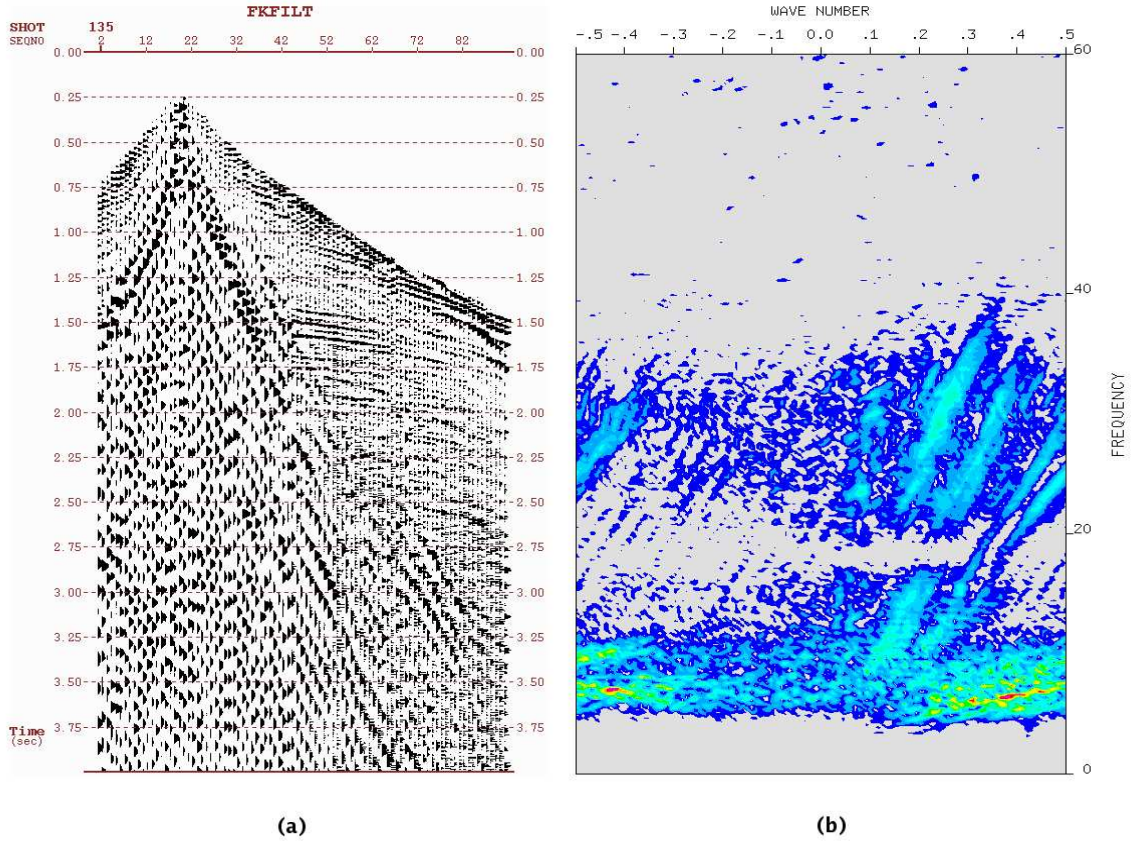


Figura 2.4: Uma família de tiro comum (domínio t-x) contaminado com o *ground roll* em (a), em (b) o mesmo evento no domínio f-k.

$$K_N = \frac{1}{2\Delta x}, \quad (2.6)$$

onde Δx representa a distância entre traços.

Para que a filtragem f-k seja possível é necessário a mudança de domínio, de t-x para f-k. Essa conversão é feita através da transformada de Fourier bidimensional que pode ser encarada como duas transformadas de Fourier, uma no domínio do tempo e a outra no domínio do espaço.

A transformada direta de Fourier bidimensional de uma função contínua $f(x,t)$ é

$$F(k_x, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) e^{ik_x x - iwt} dx dt. \quad (2.7)$$

Sendo a transformação reversível, podemos obter a função $f(x,t)$ através da transformada inversa de Fourier bidimensional, isto é,

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, w) e^{-ik_x x + iwt} dk_x dw. \quad (2.8)$$

Os dados sísmicos são amostrados discretamente, portanto não são representados por funções contínuas, sendo assim devemos utilizar a transformada discreta de Fourier.

A Figura 2.5 esquematiza a passagem do domínio t-x para o f-k.

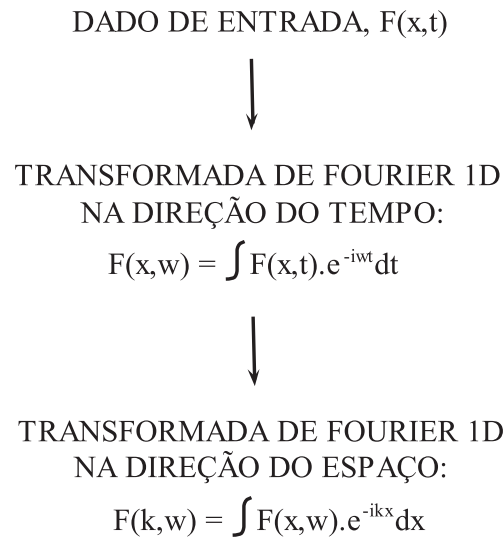


Figura 2.5: Cálculo da transformada de Fourier 2D (Yilmaz, 2001).

A representação no domínio f-k dos dados sísmicos também é conhecido como espectro de amplitude 2D dos dados, pois a variação de cores indica uma escala de amplitude dos eventos em um domínio bidimensional.

2.3 Filtragem direcional 2D no domínio do tiro

A filtragem direcional tem como princípio básico a coerência de amplitudes existente nos ruídos lineares na direção de mergulho desses eventos. A derivada calculada na direção do mergulho terá valores próximos a zero. Esses valores poderão ser aplicados às amostras resultando em uma atenuação, onde houver coerências de amplitudes³, e uma amplificação onde houver contrastes de amplitudes (amplificação do sinal).

2.3.1 Obtenção do filtro de derivada direcional

Para estimar a derivada na matriz de dados são calculados operadores de derivada. Os operadores podem ter dimensões variadas. De uma maneira genérica podemos representar operadores de dimensão arbitrária na forma $\mathbf{O}(n, m)$, onde n representa o número de linhas dos operadores e m o número de colunas. Sendo assim podemos ter operadores $\mathbf{O}(3, 3)$, $\mathbf{O}(6, 6)$ (operadores simétricos), ou $\mathbf{O}(3, 6)$, $\mathbf{O}(3, 12)$ (operadores assimétricos).

Cada operador tem a função de estimar a derivada em uma região específica na matriz de dados $A(nz, nx)$, onde nz representa o número de amostras em um traço e nx representa a quantidade total de traços a ser filtrada.

Para operadores $\mathbf{O}(3, 3)$, a Figura 2.6 exemplifica a região de atuação específica de cada um dos nove operadores $\mathbf{O}^1, \mathbf{O}^2, \dots, \mathbf{O}^9$.

Os operadores $\mathbf{O}^1, \mathbf{O}^3, \mathbf{O}^7, \mathbf{O}^9$ estimam a derivada nas amostras dos vértices da matriz. O operador $\mathbf{O}^5$ é o operador principal e tem a função de avaliar a derivada na maior parte da matriz, ou seja, de $[2 \leq x_j \leq nx - 1 \text{ e } 2 \leq t_i \leq nx - 1]$. Os operadores $\mathbf{O}^2, \mathbf{O}^4, \mathbf{O}^6$ e $\mathbf{O}^8$ têm a função de estimar a derivada no restante da matriz.

A Figura 2.7 ilustra o método utilizado pelo operador central $\mathbf{O}^5$ na obtenção da derivada. Os pontos enumerados de 1 a 9 indicam as posições das observações, ou seja, as amostras $A_1, \dots, A_9$. É importante salientar que o ângulo θ é dependente da direção $\mathbf{r}$. A seta indica a direção e o sentido da derivada.

Uma aproximação da derivada (calculada no ponto central do operador) com relação a uma determinada direção $\mathbf{r}$, pode ser obtida tomando-se a diferença dos valores interpolados na vizinhança positiva e negativa da posição central do operador, simetricamente distribuídas ao longo da direção $\mathbf{r}$. Seguindo o procedimento proposto por Melo et al. (2009), utilizamos no presente trabalho o método de interpolação baseado no inverso da distância (Shepard, 1968).

Seja $f(x, t) = f(\mathbf{r})$ a função que representa o campo de onda num sismograma. Podemos

³haverá coerência na direção de mergulho dos eventos lineares

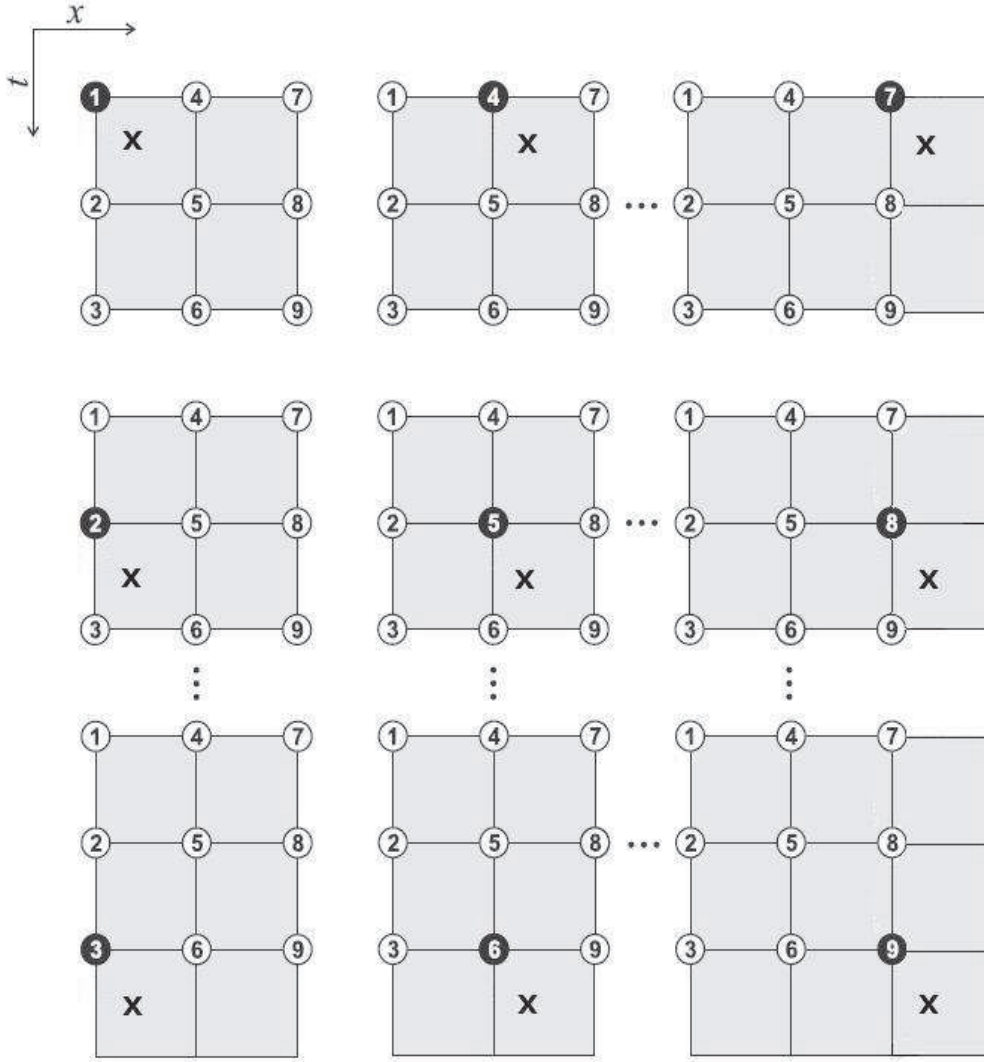


Figura 2.6: Esquema de atuação de cada operador na matriz de dados (Melo, 2009).

obter uma aproximação numérica da primeira derivada direcional através da equação

$$f(\mathbf{r}^+) \approx \sum_{i=1}^n \omega_i^+ A_i = I(\mathbf{r}^+) = \mathbf{I}^+, \quad (2.9)$$

$$f(\mathbf{r}^-) \approx \sum_{i=1}^n \omega_i^- A_i = I(\mathbf{r}^-) = \mathbf{I}^-, \quad (2.10)$$

onde: $\mathbf{I}^+$ e $\mathbf{I}^-$ indicam os valores interpolados nas posições $\mathbf{r}^+ = (x + \delta_x, t + \delta_t)$, e $\mathbf{r}^- = (x - \delta_x, t - \delta_t)$.

Os pesos utilizados na interpolação linear são calculados através da equação,

$$\omega_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}} \quad (2.11)$$

onde

$$d_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|,$$

representa a distância entre as posições $r_1, \dots, r_9$ à posição $\mathbf{r}^+$ ou $\mathbf{r}^-$ onde desejamos interpolar.

A distância d_i é função da velocidade v que por sua vez depende de θ , este sendo dado por

$$\theta = \arctg \frac{dt}{dx} v, \quad (2.12)$$

onde dx é o intervalo entre traços e dt o intervalo de amostragem.

A derivada na direção $\mathbf{r}$ pode ser estimada através da equação,

$$\frac{df(x, t)}{d\mathbf{r}} \approx \frac{I(\mathbf{r}^+) - I(\mathbf{r}^-)}{2\delta_r} = \sum_{i=1}^n \frac{(\omega_i^+ - \omega_i^-) A_i}{2\delta_r}, \quad (2.13)$$

onde $\delta_r > 0$ representa uma perturbação na distância $\mathbf{r}$ (distância entre o ponto interpolado e o ponto de aplicação do filtro).

A equação (2.13) resulta numa aproximação da derivada direcional, através da diferença entre dois pontos interpolados, vizinhos ao ponto desejado.

Para estimar o operador filtro de derivada 2D que será utilizado na convolução dos dados, combina-se os coeficientes de dois operadores, obtidos da interpolação, obtendo-se apenas um operador:

$$\mathbf{D}_r = \mathbf{O}^+ - \mathbf{O}^- = \left\{ \frac{(\omega_i^+ - \omega_i^-)}{2\delta_r}, i = 1, \dots, n \right\}. \quad (2.14)$$

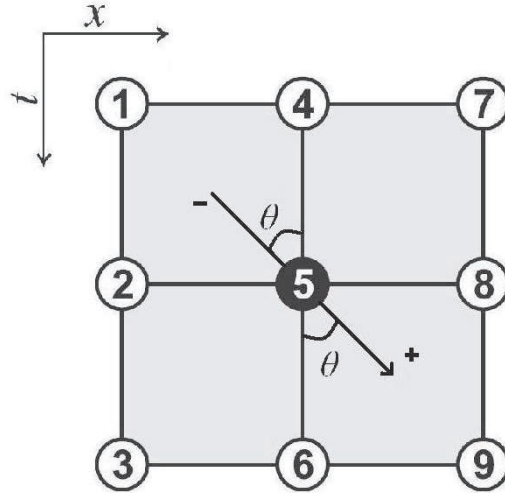


Figura 2.7: Representação esquemática da atuação do operador $\mathbf{O}^5 3 \times 3$. A derivada no ponto 5, tomada ao longo da direção $\mathbf{r}$, é obtida através da diferença entre os valores interpolados nas posições opostas $\mathbf{r}^+$ e $\mathbf{r}^-$. Notar que o valor de θ é função de $\mathbf{r}$.

Considerando que as amostras do sismograma distribuem-se sobre uma malha regular, o operador 2D precisa ser calculado apenas uma vez e sua aplicação à toda matriz de dados pode ser feita através de uma convolução 2D do operador obtido com a matriz de dados. A primeira derivada é dada por:

$$\mathbf{A}'_r = \mathbf{A} * \mathbf{D}_r, \quad (2.15)$$

onde $*$ é o sinal de convolução, $\mathbf{D}_r$ representa o filtro 2D estimado de primeira derivada, $\mathbf{A}$ indica a matriz de entrada ($n_z \times n_x$) associada ao sismograma e $\mathbf{A}'_r$ indica a matriz filtrada.

Podemos também aplicar o filtro em cascata para obter derivadas de ordem superior.

CAPÍTULO 3

Resultados Obtidos

Para testar o novo método de filtragem foi usado um dado sintético, além de utilizada duas linhas sísmicas de dados reais, sendo uma terrestre e outra marinha. Todo o processamento foi realizado utilizando os pacotes de processamento sísmico *Seismic Unix* (SU) e *Focus* da Paradigm. Nos dados reais, foram utilizados os métodos de filtragem expostos no capítulo 2. Foram realizadas etapas equivalentes nos fluxogramas de processamento, mudando somente o método de filtragem, para posteriores comparações de resultados.

3.1 Aplicação da filtragem direcional 2D em dados sintéticos

Para testar a validade do novo método de filtragem proposta, foi sintetizado uma família de tiro comum, contendo cinco eventos lineares.

Os parâmetros utilizados na criação do sismograma está exposto na tabela abaixo. A Figura 3.1 apresenta os dados antes e após a filtragem.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS	PARÂMETROS UTILIZADOS
Intervalo entre receptores (m)	50
Número de canais	120
Intervalo de amostragem (ms)	4
Número de amostras	1251
Tempo de registro (s)	5
Velocidade do ruído (m/s)	1500

Observa-se que a amplitude dos eventos foram bastante atenuadas com a aplicação da derivada na direção do mergulho. É importante salientar que para este tiro a frequência dos eventos foi de 6 Hz .

Para verificar a sensibilidade do filtro com a variação da frequência, foram sintetizadas

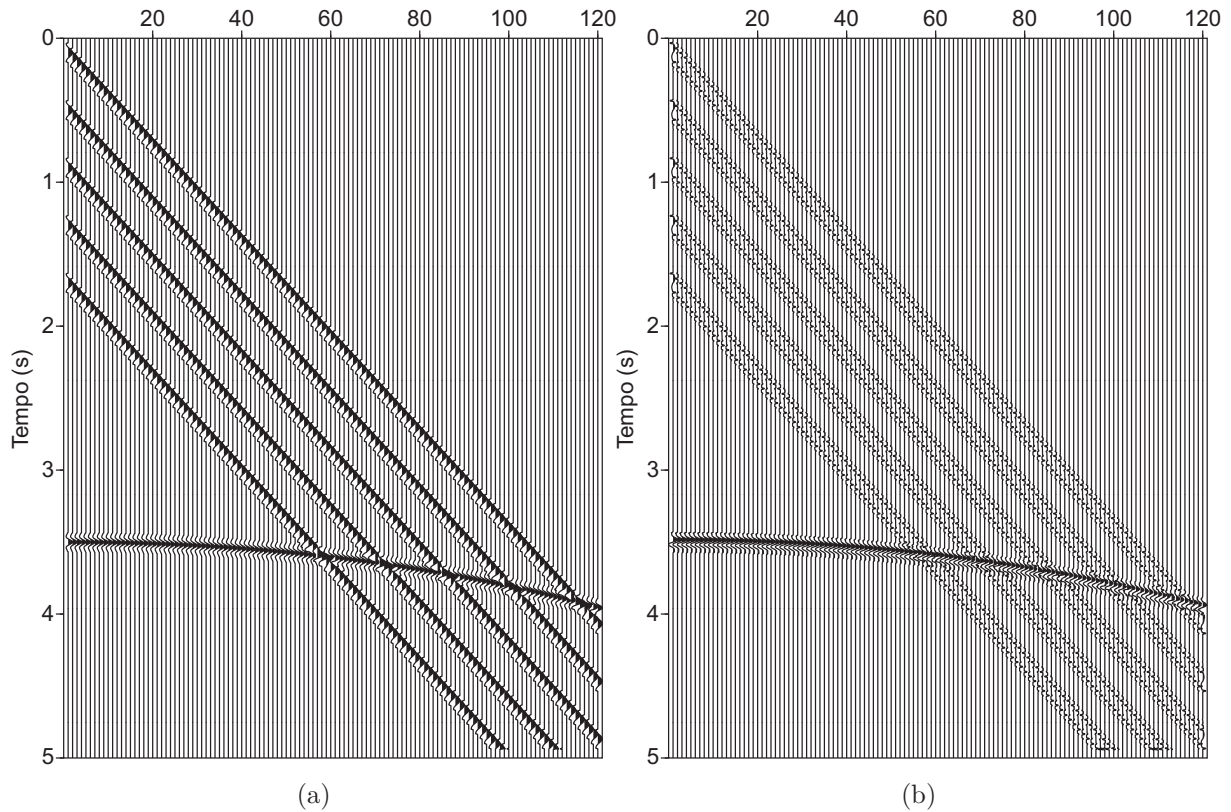


Figura 3.1: Tiro sintético bruto (6 Hz) em (a) e após a filtragem em (b).

duas famílias de tiro comum com os mesmos parâmetros anteriores, porém com frequências de 20 Hz e 30 Hz . As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam os resultados obtido pela filtragem nos dois tiros.

Percebe-se que para as frequências de 15 Hz e 30 Hz o filtro passou a não apresentar um resultado satisfatório. Com o aumento da frequência, a coerência traço a traço passou a ser de difícil detecção pelo filtro, pois a distância das amplitudes máximas entre traços consecutivos passam a ser maiores.

A Figura 3.4 ilustra a distância (representado pela letra a) entre máximos de amplitude para os eventos lineares de frequência 30 Hz .

Como o operador tem dimensão 3×3 (três traços por três amostras), não se obtém uma interpolação fiel à realidade. Uma solução para contornar o problema de eventos com altas frequências seria aumentar a dimensão do operador, porém, com o aumento da dimensão, o operador fica sujeito a influências de outros eventos mais externos, e as amostras mais distantes não terão grandes influências no cálculo da derivada, uma vez que os pesos calculados de tais amostras terão valores inferiores aos das amostras mais próximas.

Uma nova abordagem proposta foi a horizontalização dos eventos mergulhantes, com o intuito do operador 3×3 detectar os máximos de amplitude nos três traços vizinhos.

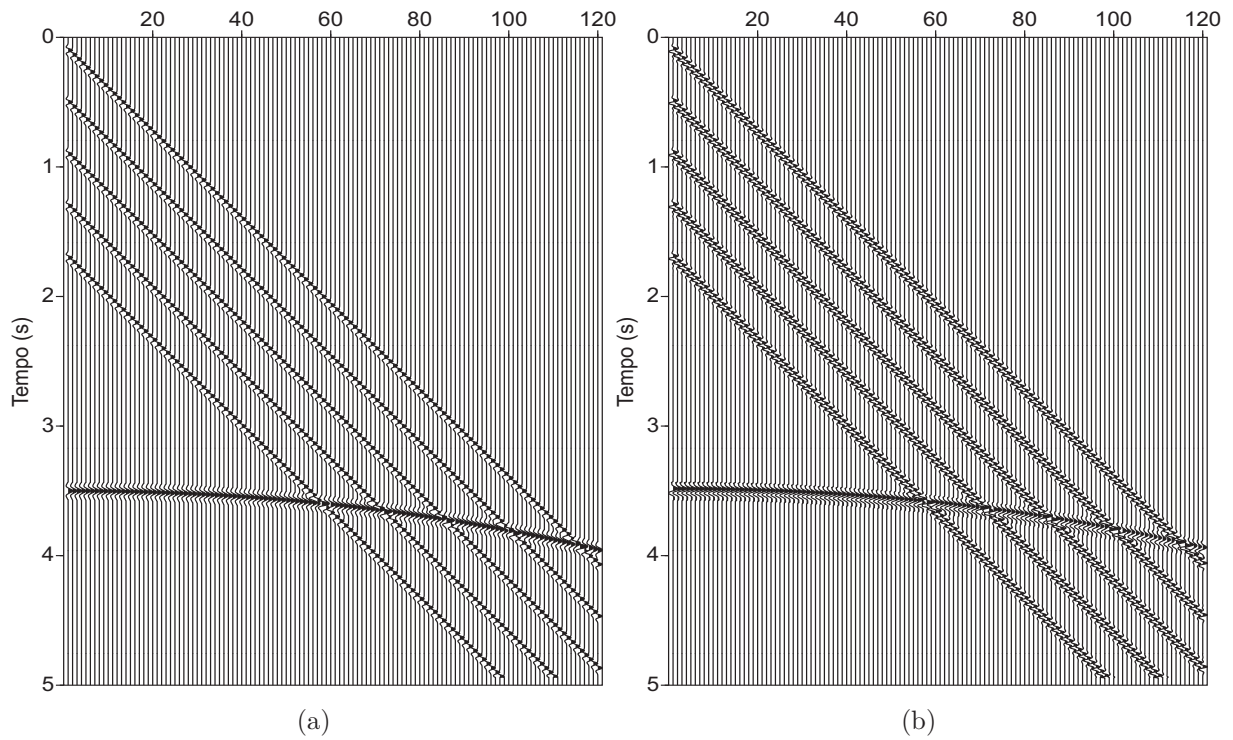


Figura 3.2: Tiro sintético (15 Hz) bruto em (a) e após a filtragem em (b).

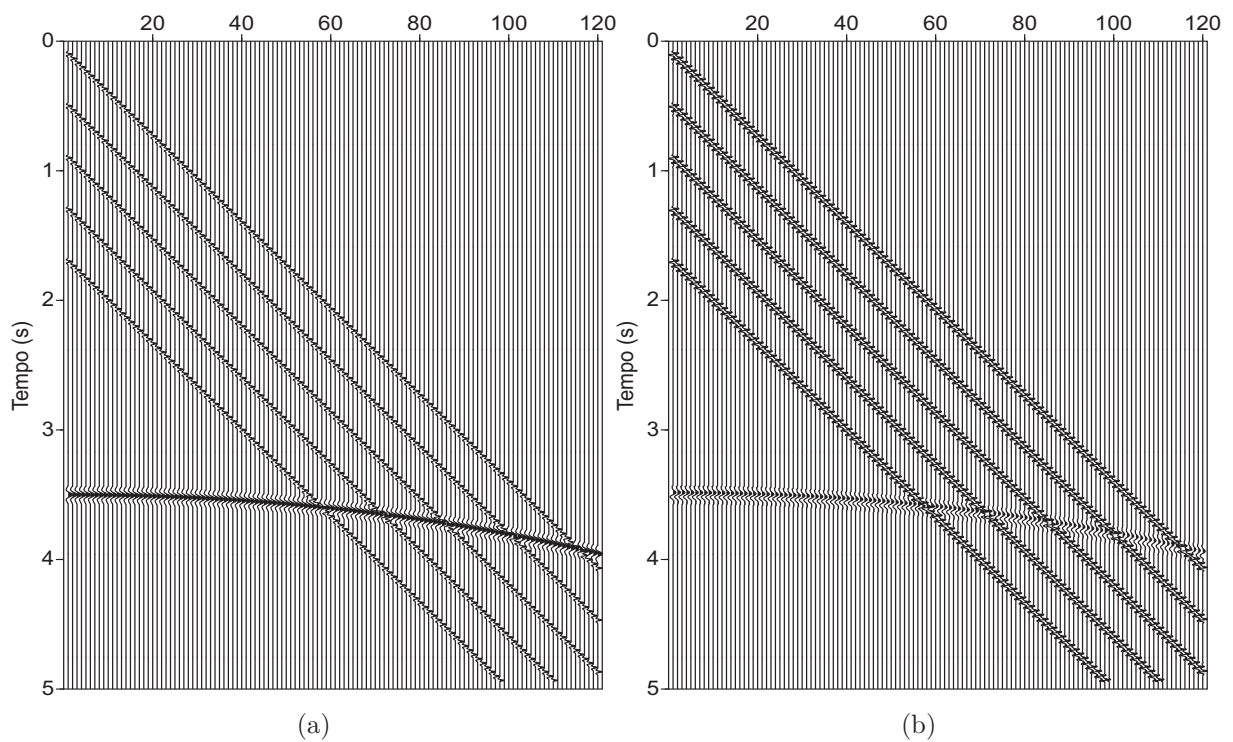


Figura 3.3: Tiro sintético (30 Hz) bruto em (a) e após a filtragem em (b).

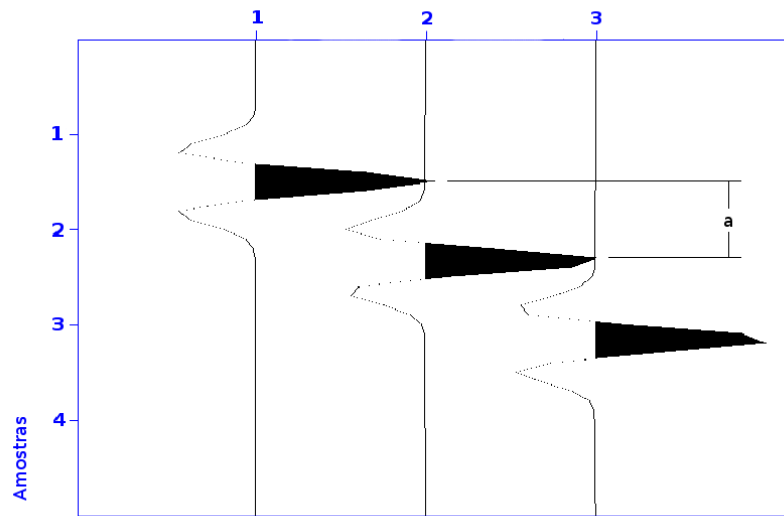


Figura 3.4: Distância entre máximos de amplitude para os eventos lineares de 30 Hz .

A Figura 3.5 apresenta a janela (delimitada em preto) de atuação do filtro, onde são tomadas as amplitudes para o cálculo da derivada.

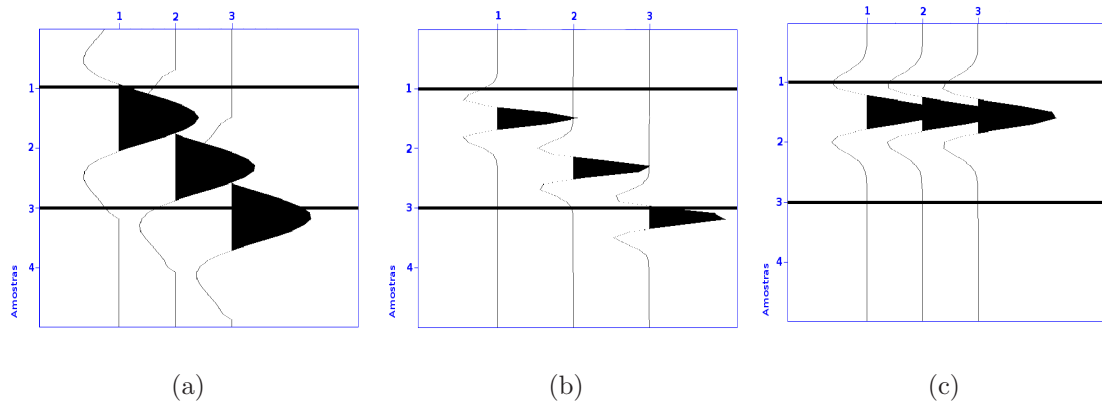


Figura 3.5: Janela de atuação (em preto) do filtro para um tiro sintético de 10 Hz (a), 30 Hz (b) e para o evento de 30 Hz com horizontalização (c).

Para o evento de 10 Hz , duas amplitudes são detectadas pelo operador, sendo a terceira delas parcialmente detectada. No evento de 30 Hz , somente duas amplitudes conseguem ser contabilizadas no cálculo da derivada, a terceira praticamente não participa no cálculo da derivada. Para o evento horizontalizado, as três amplitudes são perfeitamente detectadas, sendo assim, o cálculo da derivada se torna bastante efetivo.

A Figura 3.6, mostra os eventos sub-horizontalizados após a aplicação de um algoritmo desenvolvido para este fim, para uma distância entre máximos de 8 amostras.

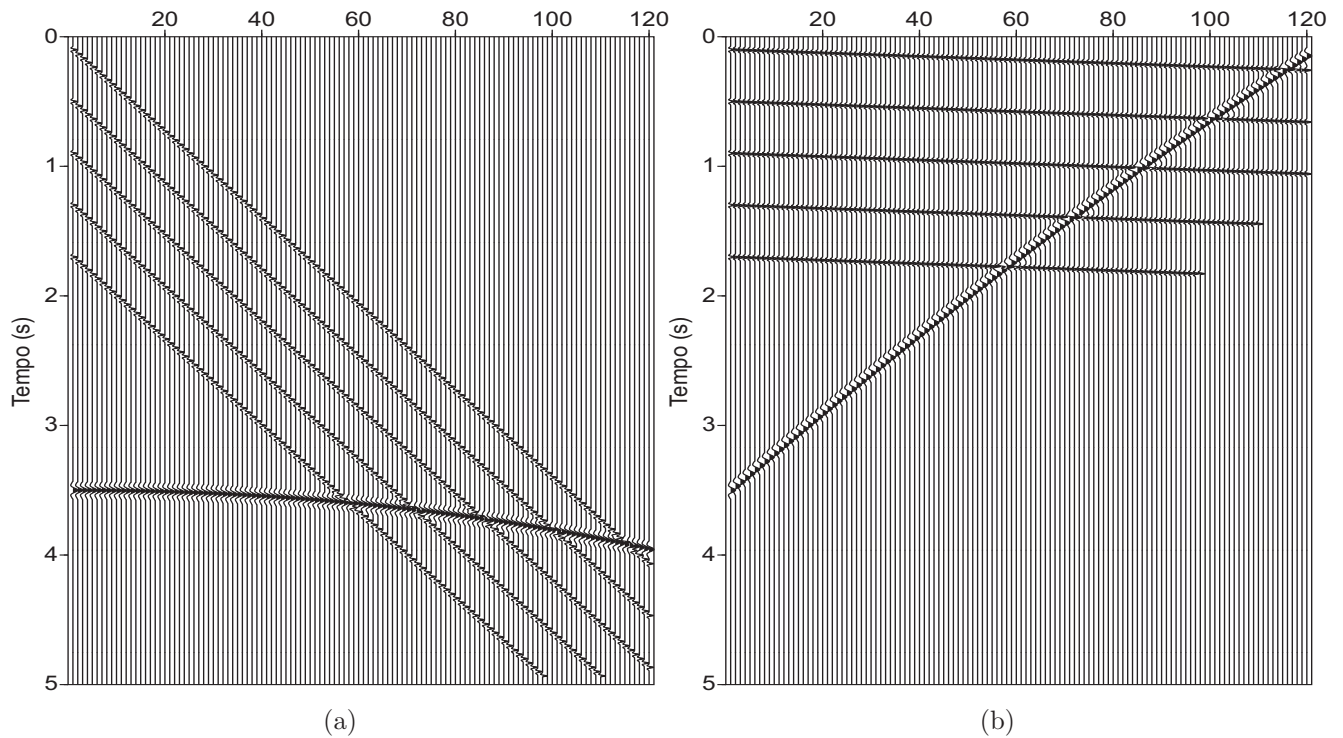


Figura 3.6: Tiro sintético bruto (30 Hz) em (a) e após a horizontalização em (b).

Para filtrar um evento horizontal deve-se utilizar uma velocidade muito elevada, sendo equivalente a um ângulo θ próximo a 90° .

A Figura 3.7 a seguir, mostra o tiro filtrado ainda sub-horizontalizado.

Após a filtragem é retirado o efeito da horizontalização dos dados, colocando assim, as amostras nas suas posições de origem.

A Figura 3.8 apresenta o tiro antes (Figura 3.8-a) e após (Figura 3.8-b) a filtragem com a utilização da horizontalização.

Percebe-se que o filtro foi bastante eficaz em atenuar o evento linear de 30 Hz com o auxílio da horizontalização.

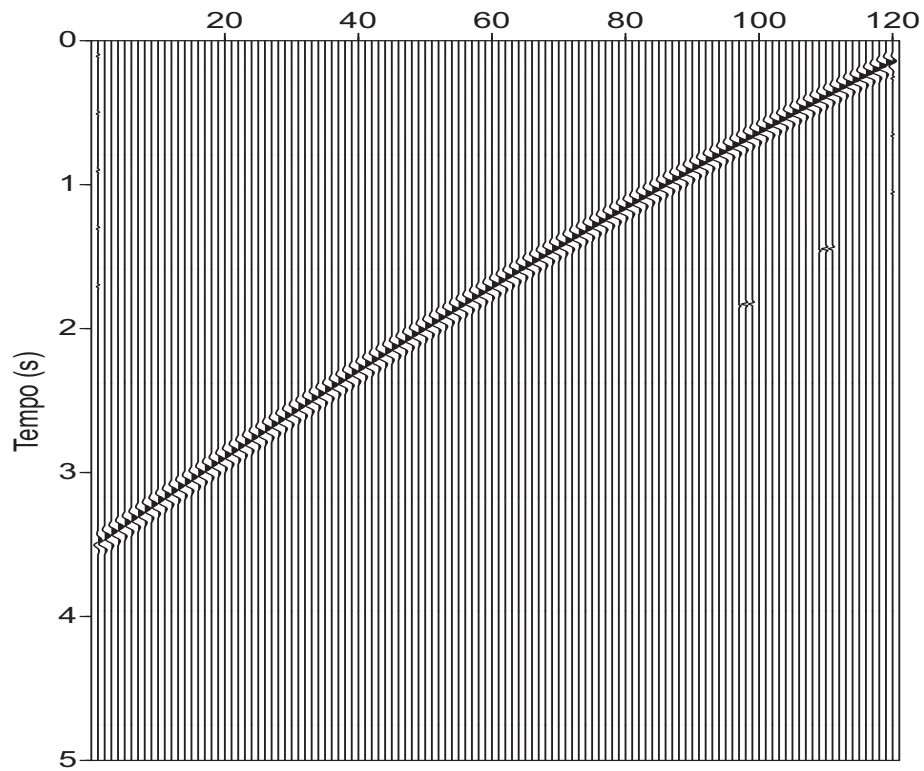


Figura 3.7: Tiro filtrado utilizando uma velocidade de 38000 m/s.

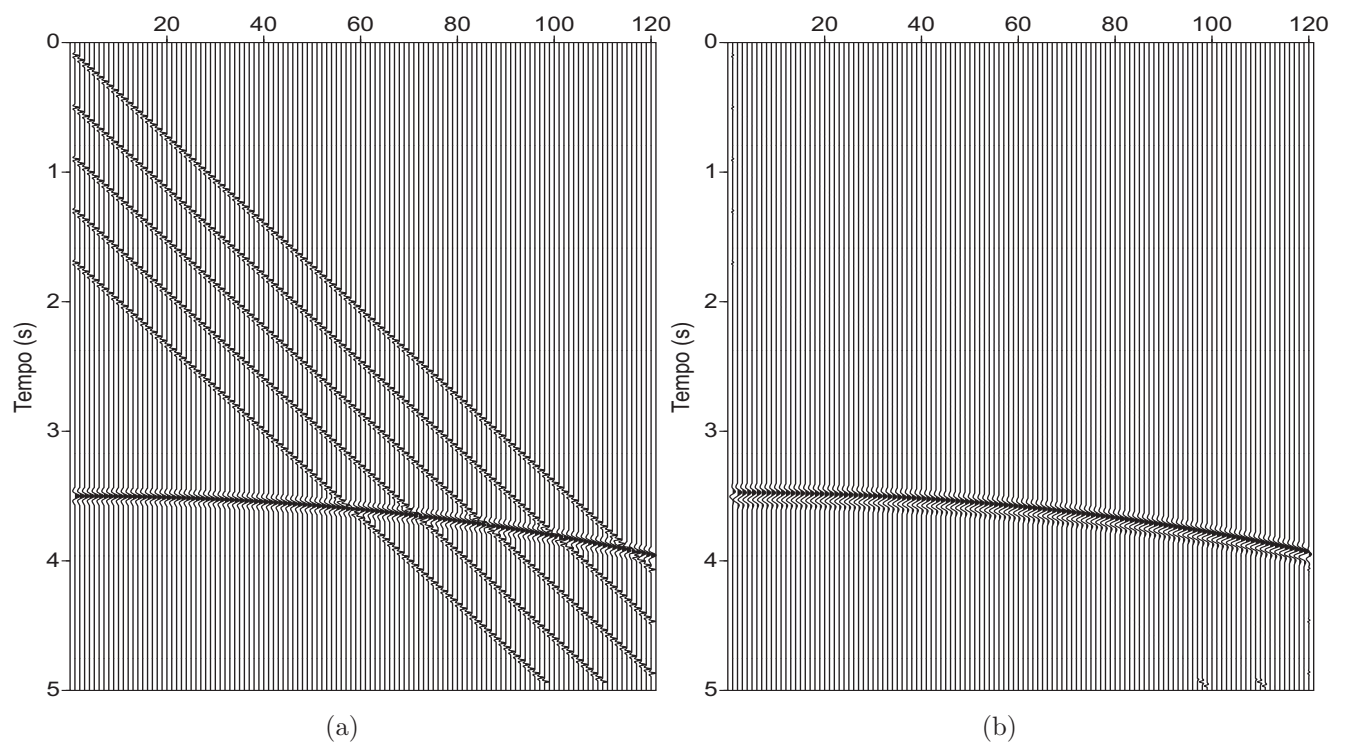


Figura 3.8: Tiro sintético bruto (30 Hz) em (a) e após a filtragem com o auxílio da horizontalização em (b).

3.2 Processamento da linha 204-RL-247 da bacia do Tacutu

3.2.1 Descrição dos dados

A bacia do Tacutu está localizada na fronteira entre o estado brasileiro de Roraima e o distrito de Rupununi na Guiana Francesa.

Diversos levantamentos 2D foram feitos na década de 80 pela PETROBRÁS, com o intuito de iniciar o processo exploratório, na porção brasileira da bacia do Tacutu. Algumas linhas foram adquiridas junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis-ANP, pela Universidade Federal da Bahia/CPGG.

A linha 204-RL-247 foi selecionada para a aplicação de métodos de filtragem com a finalidade de melhoramento da razão sinal/ruído nos dados.

A tabela 3.1 abaixo contém os parâmetros de aquisição da linha selecionada.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS	PARÂMETROS UTILIZADOS
Intervalo entre receptores (m)	50.0
Intervalo entre tiros	50.0
Número de tiros	404
Número de canais	96
Intervalo de amostragem (ms)	4
Número de amostras	1001
Tempo de registro (s)	4.0

Tabela 3.1: Tabela contendo os parâmetros de aquisição da linha 204-RL-247

3.2.2 Pré-processamento

O *ground roll* da Figura 3.9 (delimitado em azul) representa, destacadamente, o ruído de maior influência na contaminação do dado.

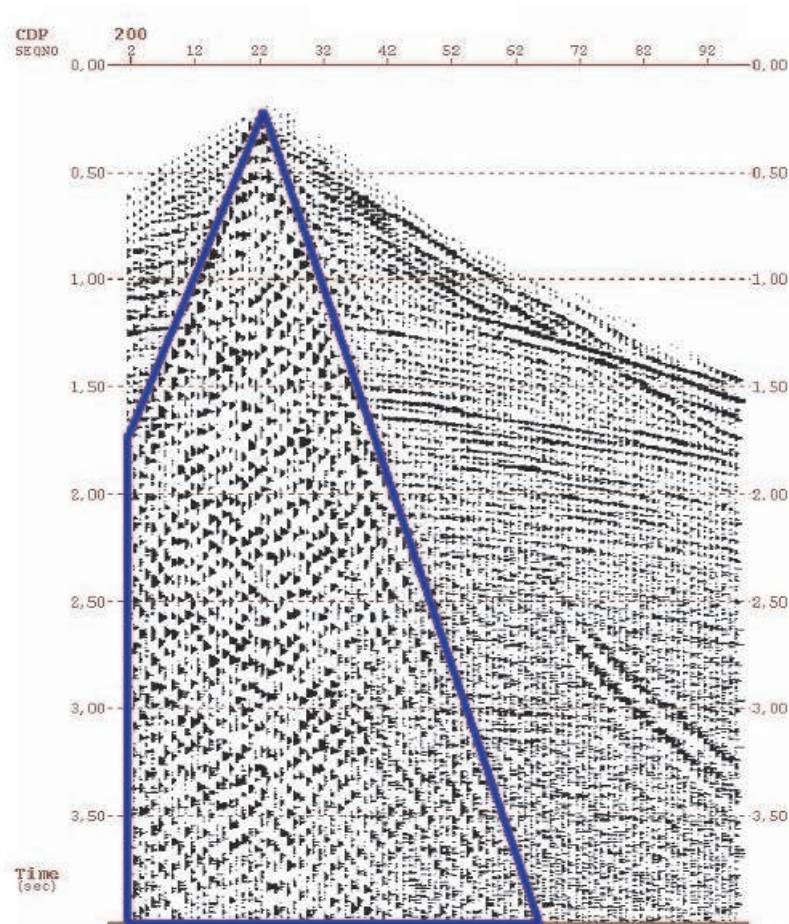


Figura 3.9: *Super Gather* formado a partir de um intervalo de família CMP (100-300), mostrando o efeito do *ground roll* na linha da bacia do Tacutu. A região marcada com um cone é onde está situada o maior efeito contaminante do ruído.

As etapas iniciais nos fluxogramas de processamento são conhecidas como pré-processamento. Para um fluxograma básico de processamento, podemos destacar as seguintes etapas:

- Geometria: visa definir as informações referentes às coordenadas (verdadeiras ou fictícias) de tiros e receptores. A definição do lanço ou arranjo usado na aquisição também é definida nessa etapa. É importante salientar que essa etapa é extremamente importante. Qualquer informação registrada de forma errônea prejudicará todos os processos posteriores;
- Edição: etapa que objetiviza eliminar traços ruidosos. Ela se torna necessária pois durante a aquisição podem ocorrer diversos problemas durante o momento de registro

das informações. Caso seja necessário, alguns traços ou até famílias de tiro inteiras devem ser removidas para evitar a contaminação desses ruídos ocasionais nos dados;

- *Mute*: a maioria dos registros contém ruídos aleatórios que se encontram antes de qualquer evento advindo da subsuperfície. Esses ruídos se apresentam no topo dos sismogramas e são retirados com o comando *top mute* do *Focus*, que simplesmente tem a função de zerar as amplitudes de uma parcela superior de cada traço, definida manualmente;
- Correção de amplitude: o sinal sísmico emitido por uma fonte é atenuado durante sua propagação. A causa dessa atenuação está basicamente atrelada a dois fatores: espalhamento geométrico e perdas por atritos. Para menores distâncias a perda por espalhamento geométrico é mais significativa em relação à dissipação por atrito, porém com o aumento da distância de propagação tornar-se mais significativa as perdas por atrito em detrimento do espalhamento geométrico (Yilmaz, 2001).

Após o pré-processamento é feito o processamento avançado, onde são realizadas filtra-gens, análise de velocidade, empilhamento e migração.

A Figura 3.10 apresenta o fluxograma simplificado utilizado neste trabalho durante o processamento da linha 204-RL-247.

Foram utilizados três métodos distintos de filtragem:

- filtro de frequência passa-alta;
- filtro bidimensional f-k;
- filtro de derivada direcional 2D.

Cada filtragem apresentou resultados distintos, uma vez que cada método utiliza princípios diferenciados.

As Figuras 3.11 e 3.12 representam, respectivamente, uma seção empilhada e um *super gather* formado com cmp's do 100 ao 300, ambos sem nenhum tipo de filtragem. Observa-se o efeito mascarador do *ground roll*, tornando a análise de velocidades imprecisa e uma seção sísmica totalmente contaminada por eventos lineares e com baixa resolução.

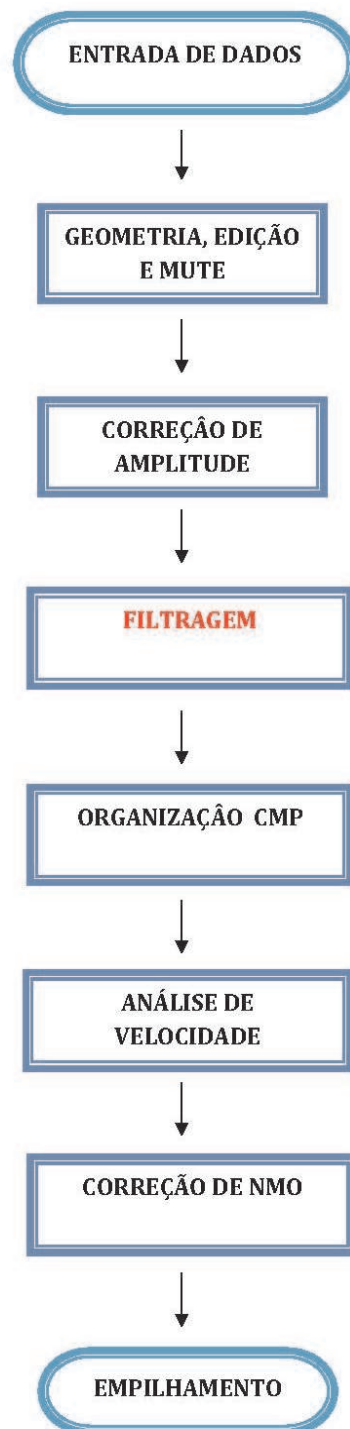


Figura 3.10: Fluxograma de processamento utilizado na linha 204-RL-247 da bacia do Tacutu.

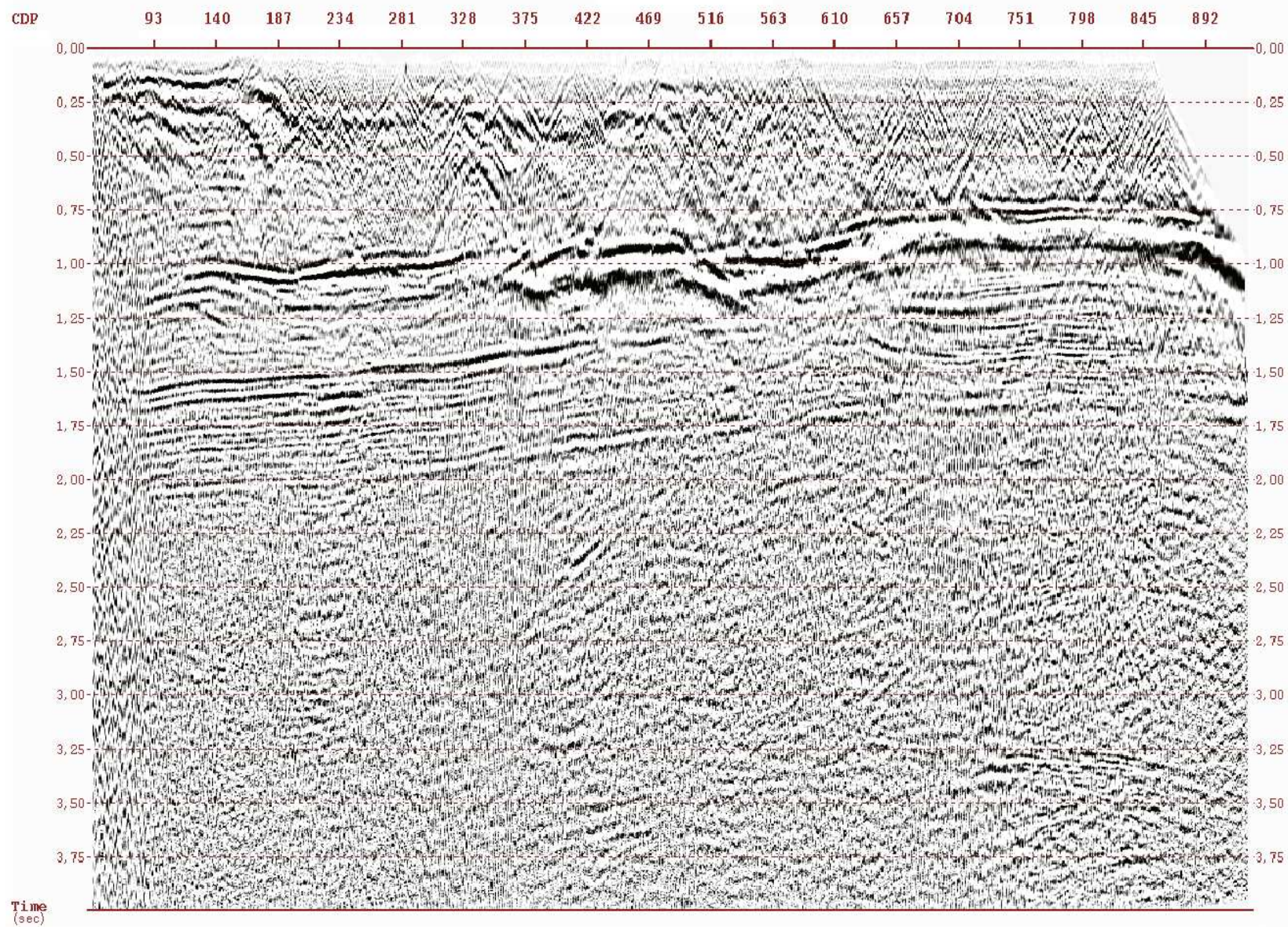


Figura 3.11: Seção empilhada sem a utilização de qualquer método de filtragem.

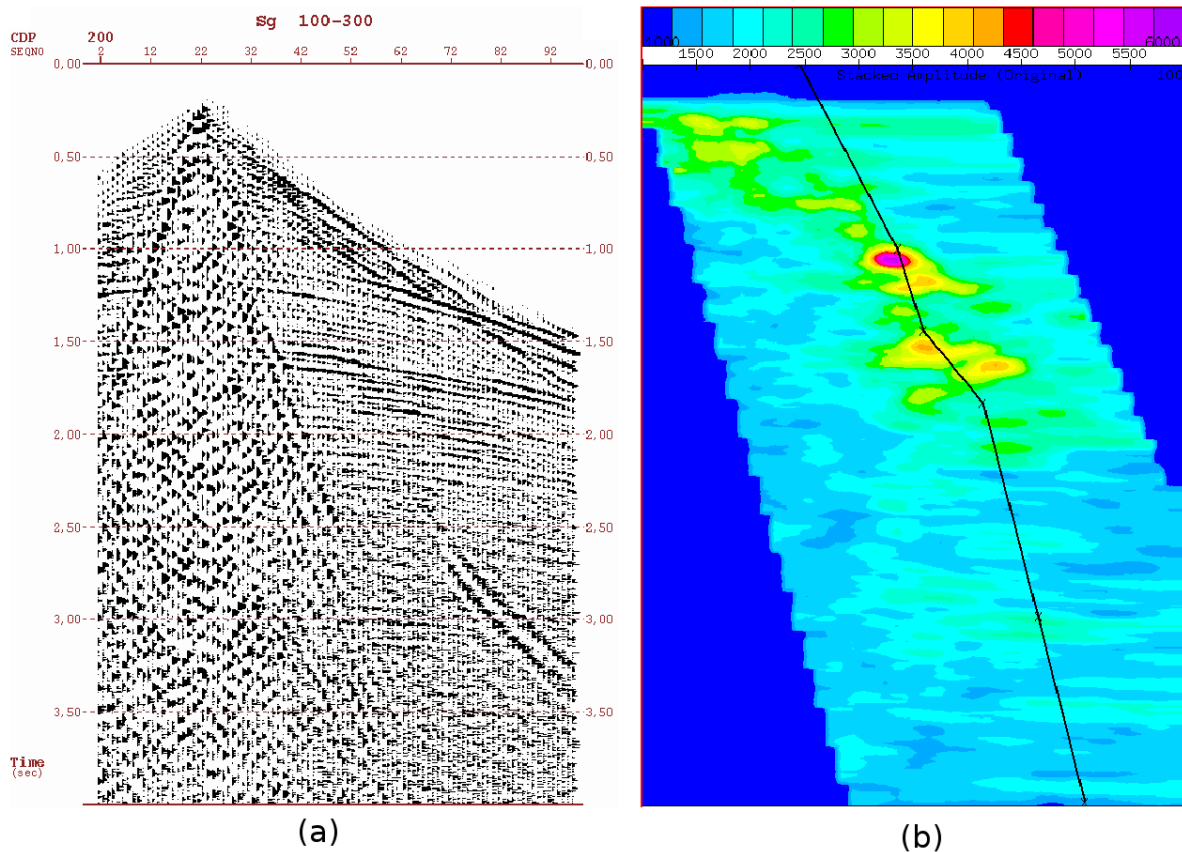


Figura 3.12: *Super Gather* formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) antes do processo de filtragem, em (a) e o espectro de velocidade em (b).

3.2.3 Utilização do filtro passa-alta

Na tentativa de eliminar o *ground roll* foi utilizado o filtro passa-alta (seção 2.1).

Para a construção do trapézio de corte do filtro, foram escolhidas as frequências 10.0, 20.0, 50.0 e 60.0 Hz . As baixas frequências foram escolhidas levando em conta o espectro de amplitude da região dominada pelo ruído linear (Figura 3.13) e as altas frequências considerando o espectros de amplitude das reflexões (Figura 3.14) nos dados.

Percebe-se que o ruído está concentrado, em sua grande maioria, em torno de 8 Hz , enquanto que as reflexões tem uma faixa de frequência mais ampla (entre 10 e 50 Hz).

Na Figura 3.15 podemos observar o resultado obtido após o processo de filtragem em um *super gather*, e o efeito da filtragem no respectivo *semblance*.

Após a aplicação do filtro foi observado uma melhora no *semblance*, as reflexões se tornaram mais evidentes, auxiliando assim a análise de velocidades, porém os dados encontram-se, ainda, com pequenas contaminações de altas amplitudes o que dificulta a marcação de

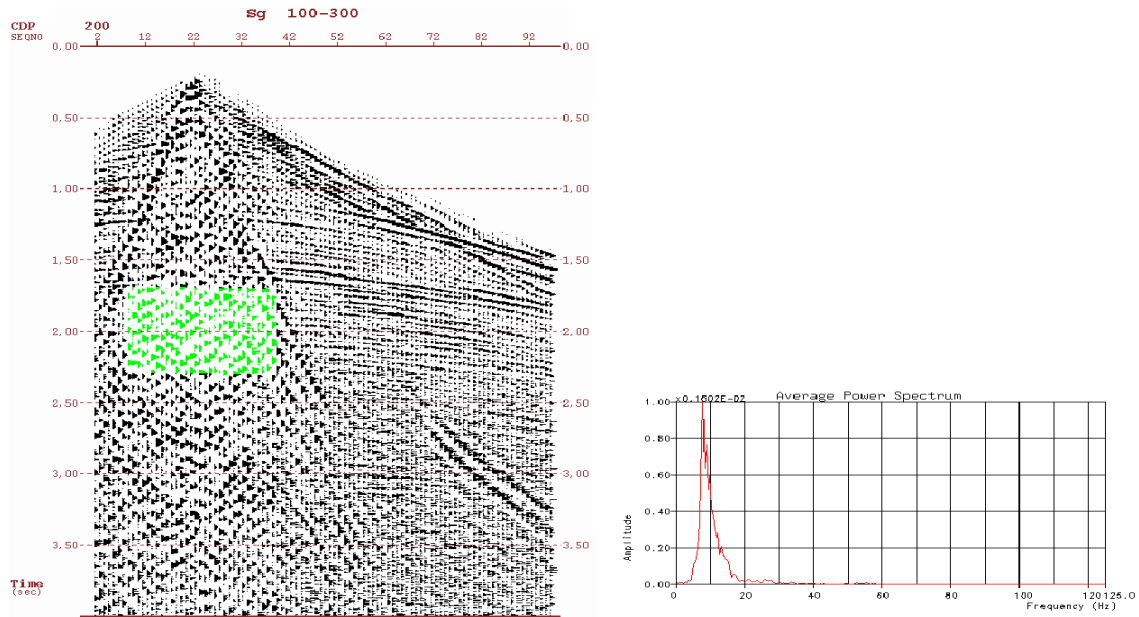


Figura 3.13: Região do *ground roll* destacada em verde, utilizada para a análise e definição do filtro passa-alta.

regiões com máxima coerência no *semblance*.

Na Figura 3.16 apresentamos a seção empilhada com a aplicação do filtro passa-alta.

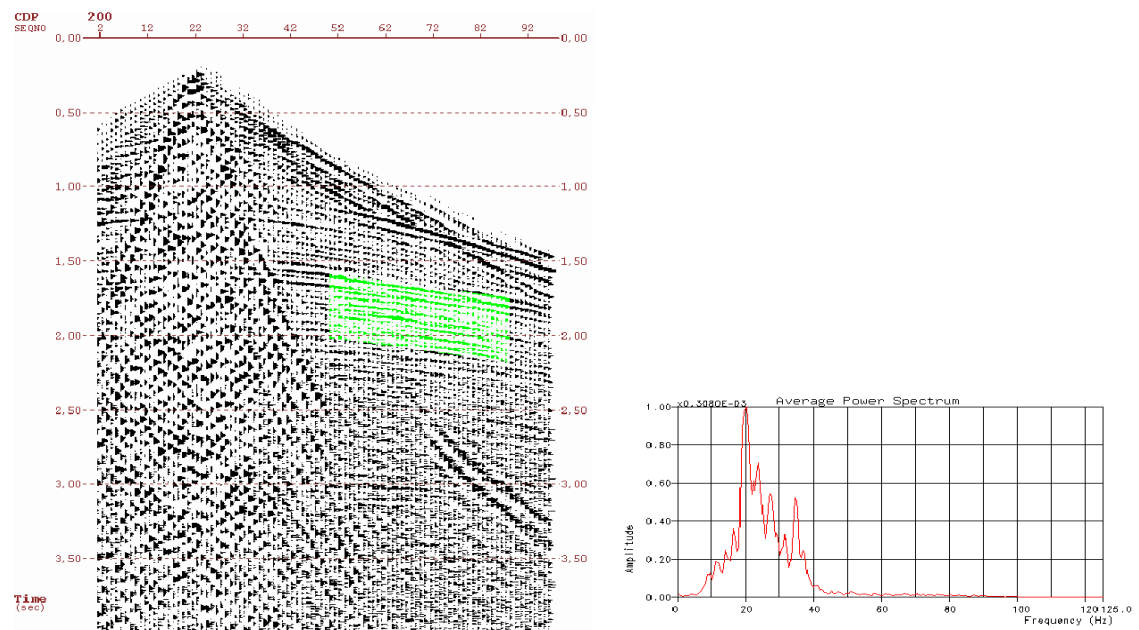


Figura 3.14: Região da reflexão destacada em verde, utilizada para a análise e definição do filtro passa-alta.

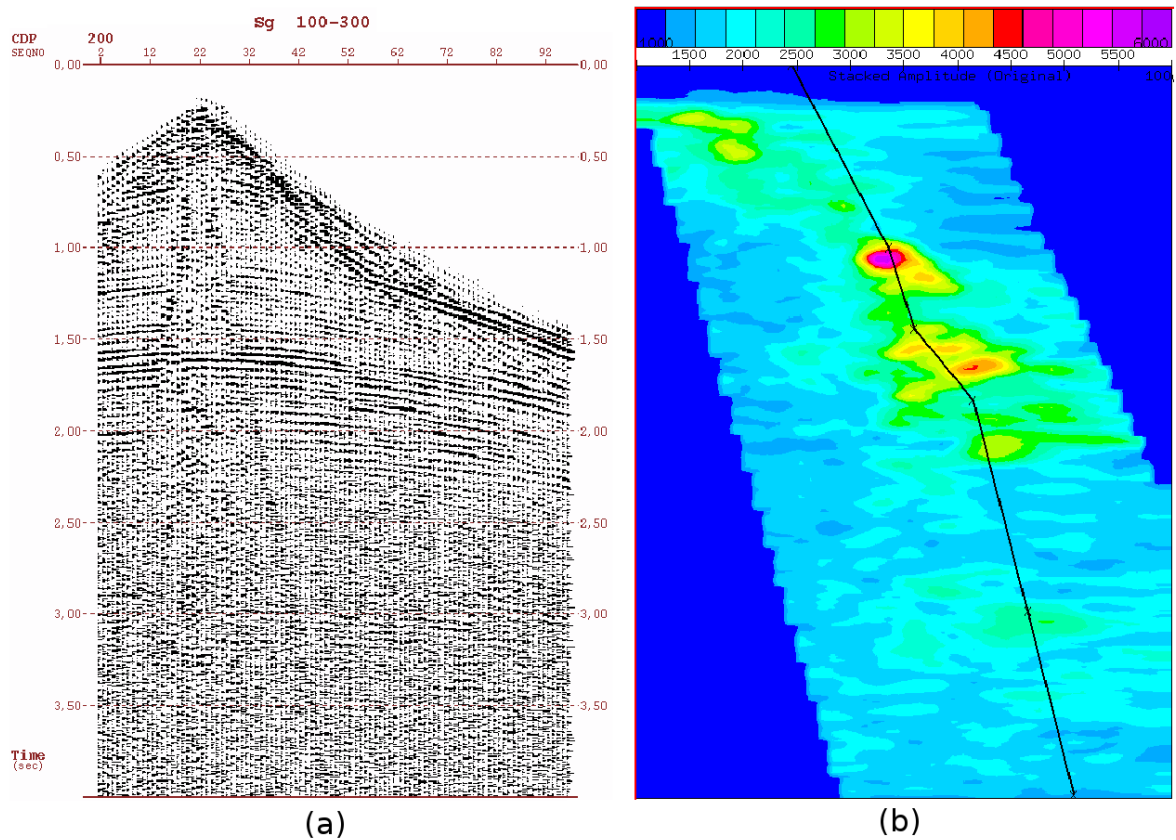


Figura 3.15: *Super Gather* formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) após o processo de filtragem com o filtro passa-alta, em (a) e o *semblance* em (b).

Através da seção conclui-se que houve uma melhoria em relação à seção bruta. A resolução vertical e horizontal tiveram expressivas melhoras devido à atenuação do ruído de baixa frequência.

Devemos notar que as reflexões com conteúdo de baixas frequências, que normalmente estão associadas a regiões de maiores profundidades, foram eliminadas, uma vez que o filtro atuou retirando todos os eventos com frequências abaixo de 10 Hz .

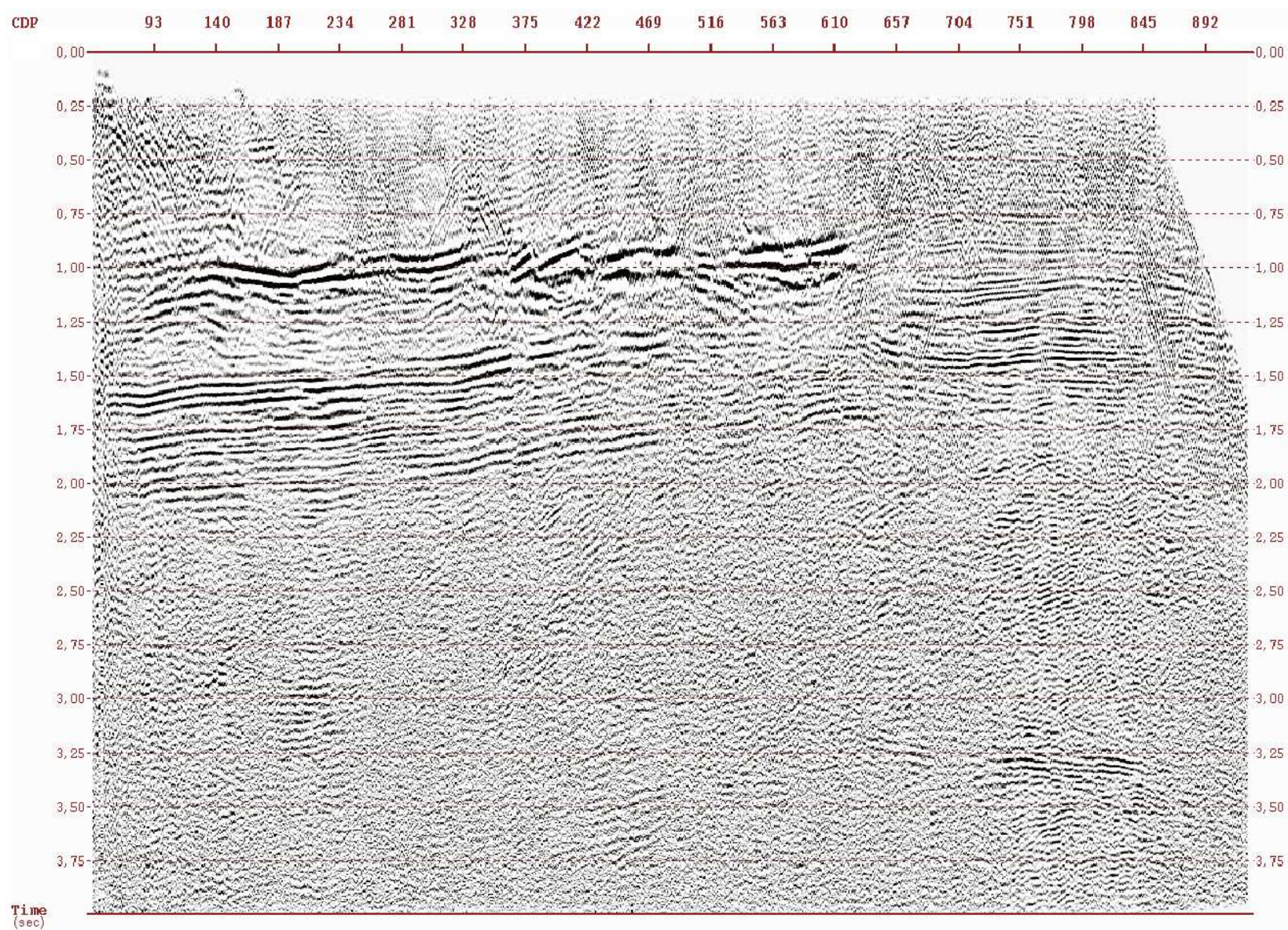


Figura 3.16: Seção empilhada com o método de filtragem passa-alta unidimensional.

3.2.4 Utilização do filtro f-k

O filtro f-k foi igualmente testado para atenuar o *ground roll* na linha do Tacutu.

Para a aplicação do filtro deve-se escolher uma região onde as amplitudes serão preservadas ou retiradas. Para a definição da área devemos levar em consideração a preservação do sinal e atenuação de eventos lineares no domínio f-k. Para isso utilizou-se um tiro para definir o filtro a ser aplicado.

A Figura 3.17 apresenta o tiro 135 e o respectivo espectro de amplitude 2D (domínio f-k). Para delimitar o polígono de corte levou-se em consideração a eliminação dos eventos lineares com origem no ponto $[k=0, f=0]$.

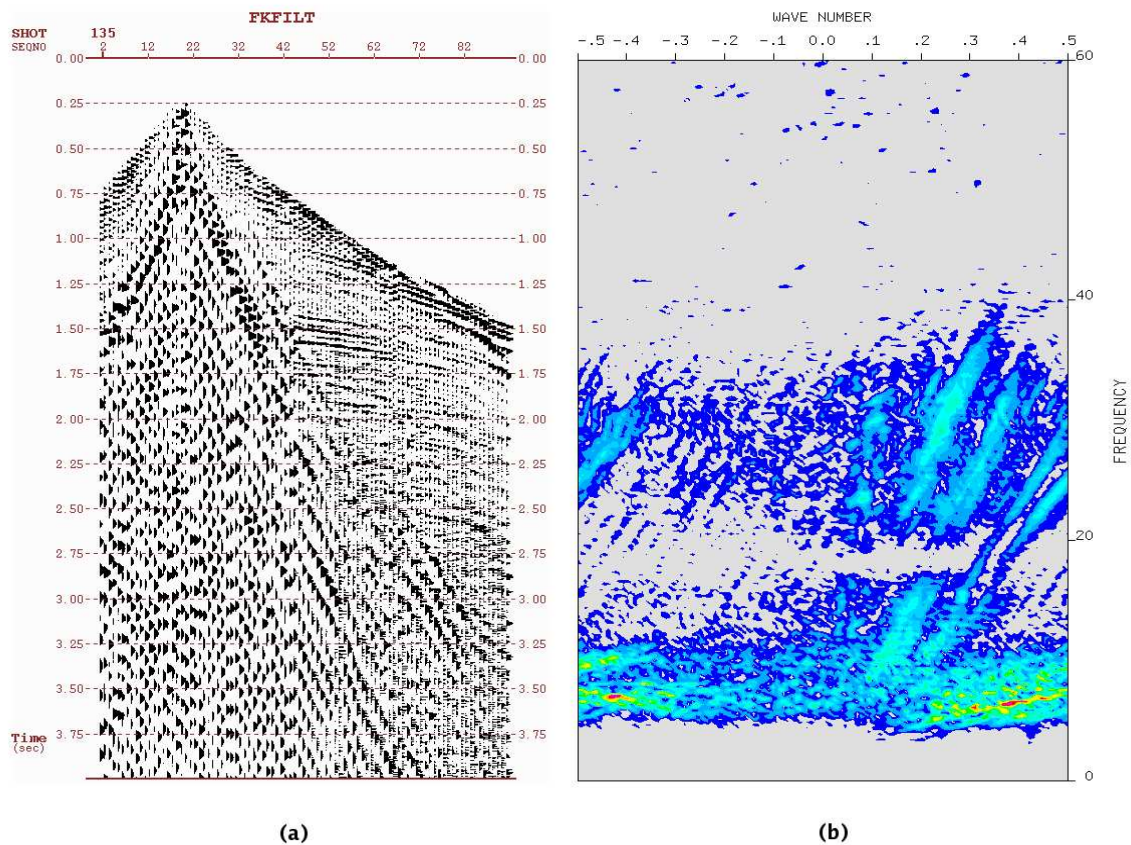


Figura 3.17: Tiro 135 mostrando a representação dos dados no domínio f-k. A partir da análise dos dados nesse domínio é possível determinar a região de corte.

A filtragem f-k foi aplicada em todo a linha no domínio do tiro. O resultado obtido está exposto na Figura 3.18.

Percebe-se uma notável melhoria no sismograma tanto em relação ao *super gather* bruto, quanto ao apresentado com a utilização do filtro passa-alta. As reflexões em torno de 1.5 - 2.0 s ficaram mais evidentes, resultando numa forte coerência no *semblance*. Percebe-se

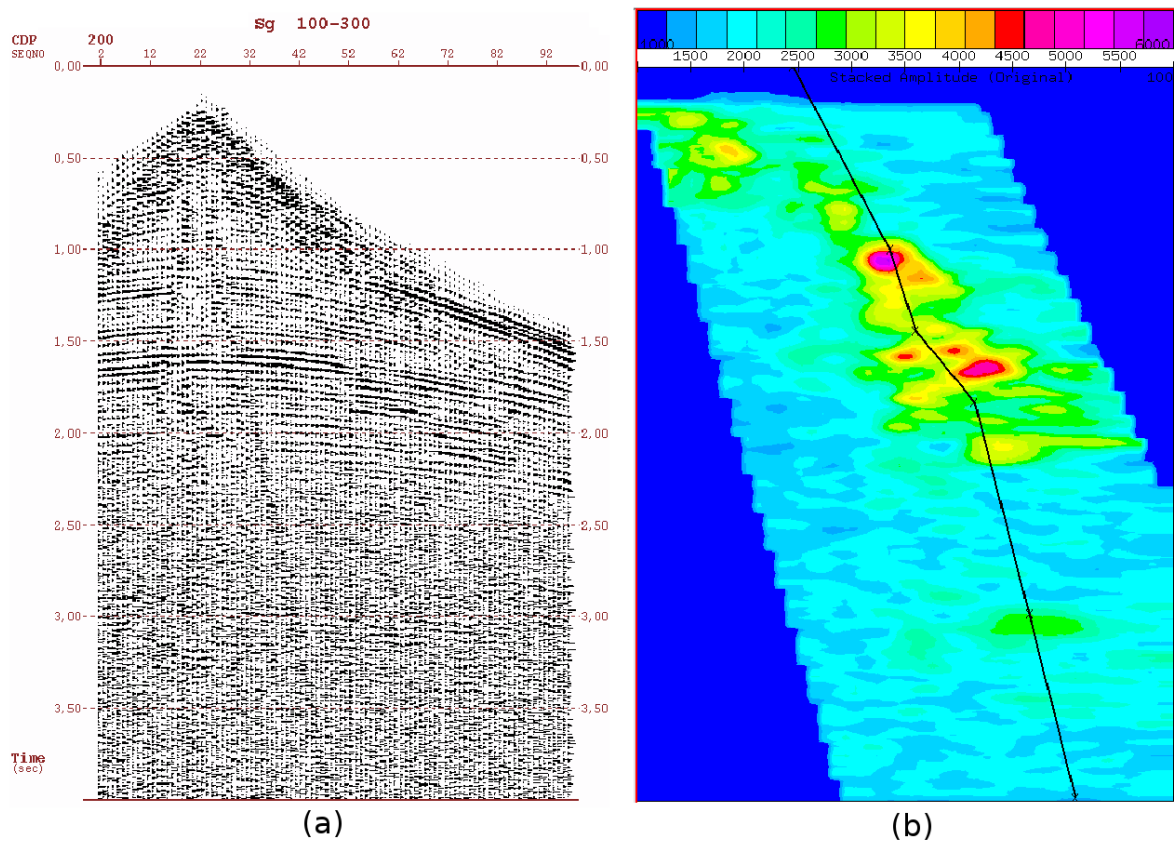


Figura 3.18: *Super Gather* formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) após o processo de filtragem f-k, com seu respectivo *semblance*.

ainda resquícios de altas amplitudes referente ao *ground roll*.

A Figura 3.19 apresenta a seção empilhada com a utilização da filtragem f-k.

Uma melhoria é observada em relação ao filtro passa-alta. As camadas com menores espessuras em torno de 1.0 - 1.5 s (a direita da figura) ficaram mais evidentes, apresentando uma melhor resolução temporal e espacial.

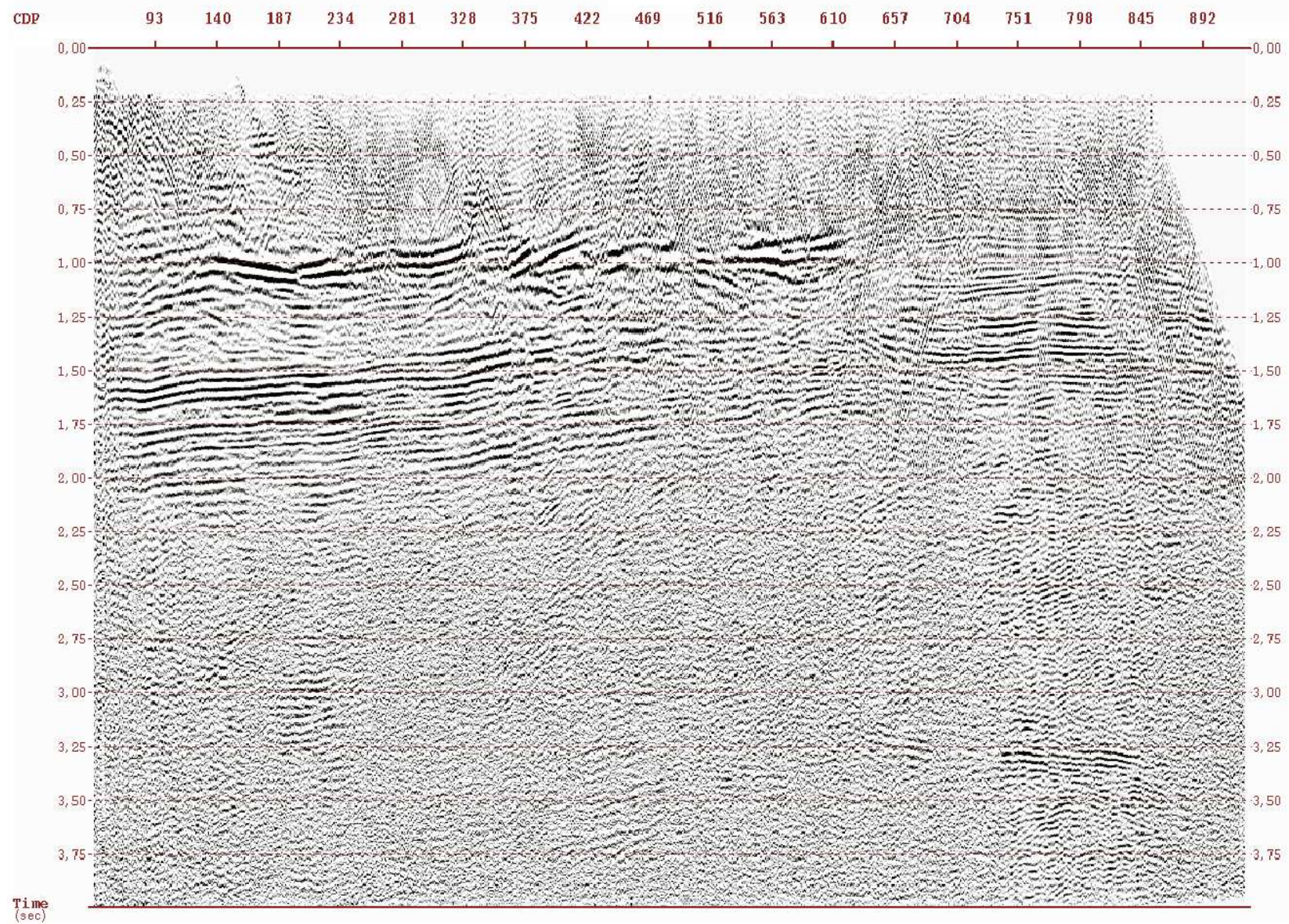


Figura 3.19: Seção empilhada com o método de filtragem f-k.

3.2.5 Utilização do filtro 2D de derivada direcional

As características do *ground roll* fazem com que ele possa ser tratado com a aplicação da derivada direcional 2D, uma vez que esse evento é linear e sua velocidade pode ser estimada nos sismogramas.

A velocidade estimada do *ground roll*, para essa linha sísmica, foi de 400 *m/s*, sendo esse valor o principal parâmetro de entrada¹ no algoritmo.

Foram utilizados operadores de dimensão 3×3 para estimar a derivada na direção do mergulho do ruído, sendo os operadores aplicados sobre a matriz dos dados em forma de convolução 2D.

A Figura 3.20 mostra o *super gather* formado pelo intervalo de cmp do 100 ao 300 após a aplicação do novo método de filtragem.

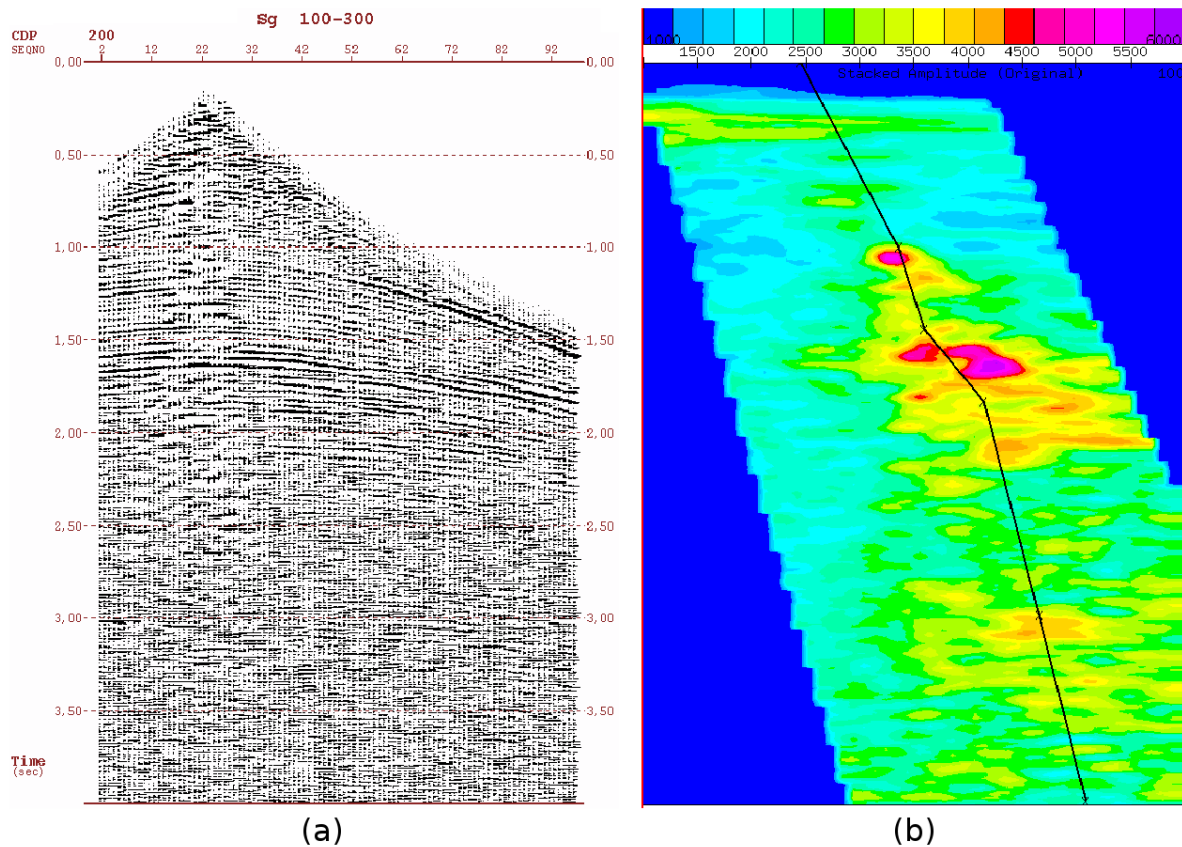


Figura 3.20: *Super Gather* formado a partir de um intervalo de família cmp (100-300) após o processo a filtragem direcional 2D, com seu respectivo *semblance*.

Percebe-se uma melhora significativa em relação aos dois métodos convencionais anteriores. O *semblance* (Figura 3.20-b) demonstra regiões de coerência com melhores definições.

¹os outros parâmetros foram: o intervalo entre traços, o intervalo de amostragem e a posição da fonte

Uma região em torno de 3.0 segundos foi melhor identificada com a utilização desse novo método.

O fluxograma utilizado está exposto na Figura 3.21.

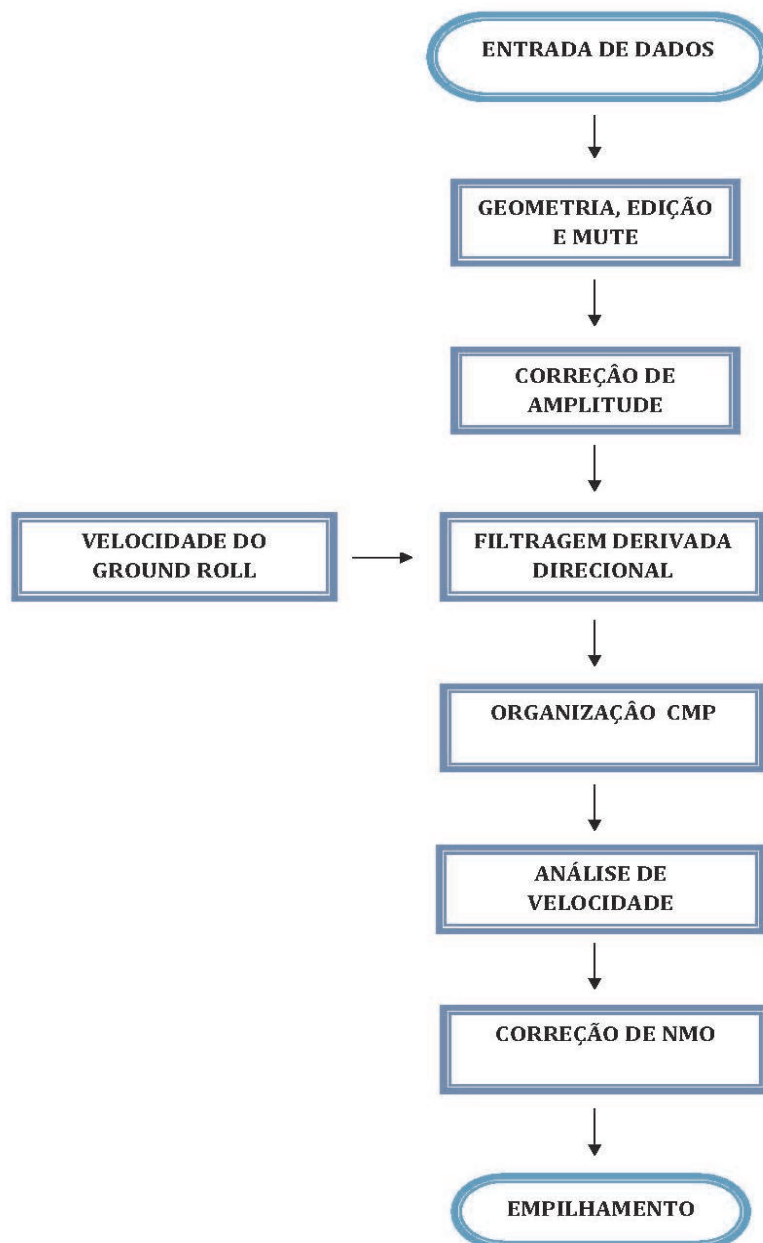


Figura 3.21: Fluxograma utilizado no processamento com a filtragem direcional.

A Figura 3.22 apresenta a seção empilhada com a utilização do novo método. Fica evidente que houve um aumento significativo de qualidade na imagem final.

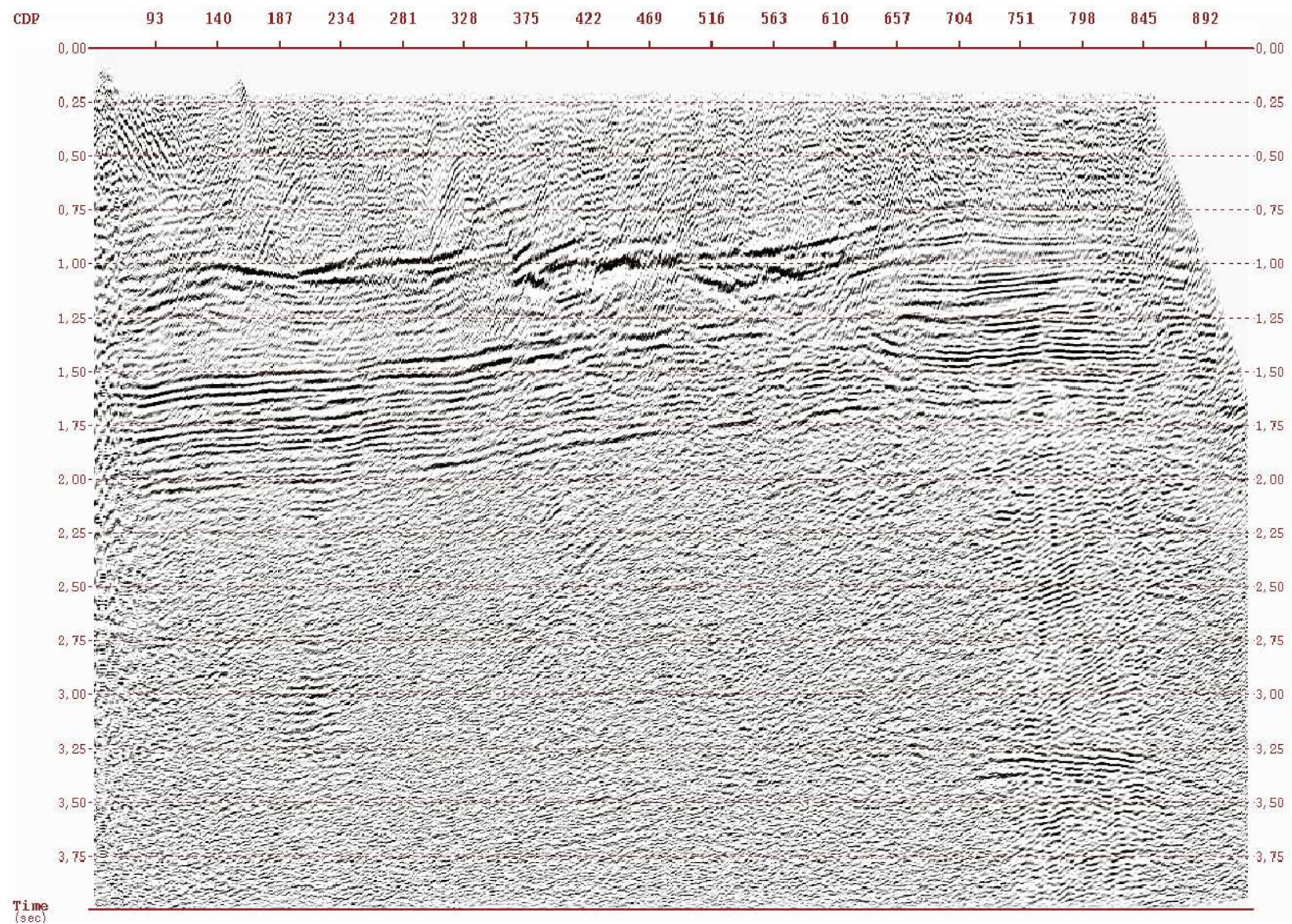


Figura 3.22: Seção empilhada com o novo método de filtragem com a derivada direcional.

A Figura 3.23 demonstra quatro regiões equivalentes ampliadas na seção empilhada. A primeira em (a) representa a seção empilhada com nenhum método de filtragem, sendo as demais com a utilização do filtro passa-alta, f-k e derivada direcional 2D.

Na seção bruta ampliada o imageamento está extremamente prejudicado pela presença do *ground roll*. As reflexões são pouco evidentes. A partir da filtragem passa-alta observa-se uma melhoria significativa dos refletores sísmicos, entretanto há a presença de eventos lineares na seção.

Na seção ampliada com filtragem f-k, nota-se que os eventos refletidos ficaram melhor evidenciados e com continuidade lateral superior ao passa-alta.

A utilização do filtro de derivada direcional 2D obteve o melhor resultado. As camadas estão bem definidas e com uma melhor continuidade, os eventos lineares que foram encontrados nas outras três seções, foram praticamente eliminados.

Na Figura 3.24 temos os espectros de frequência dos dados com os diferentes métodos.

A partir da análise da Figura 3.24 podemos concluir:

- A filtragem passa-alta atenuou bastante a frequência abaixo de 10 Hz (conforme a construção do filtro), isso fez com que a resolução vertical diminuísse, uma vez que quanto maior o conteúdo de frequência dos dados maior a resolução vertical;
- O filtro f-k mostrou-se mais eficaz na remoção do *ground roll*, além de preservar uma faixa de baixa frequência nos dados;
- A filtragem com a utilização da derivada direcional 2D foi bastante eficaz na atenuação da amplitude do ruído, preservando um maior conteúdo de baixas frequências, além de amplificar a faixa de altas frequências em relação aos demais filtros.

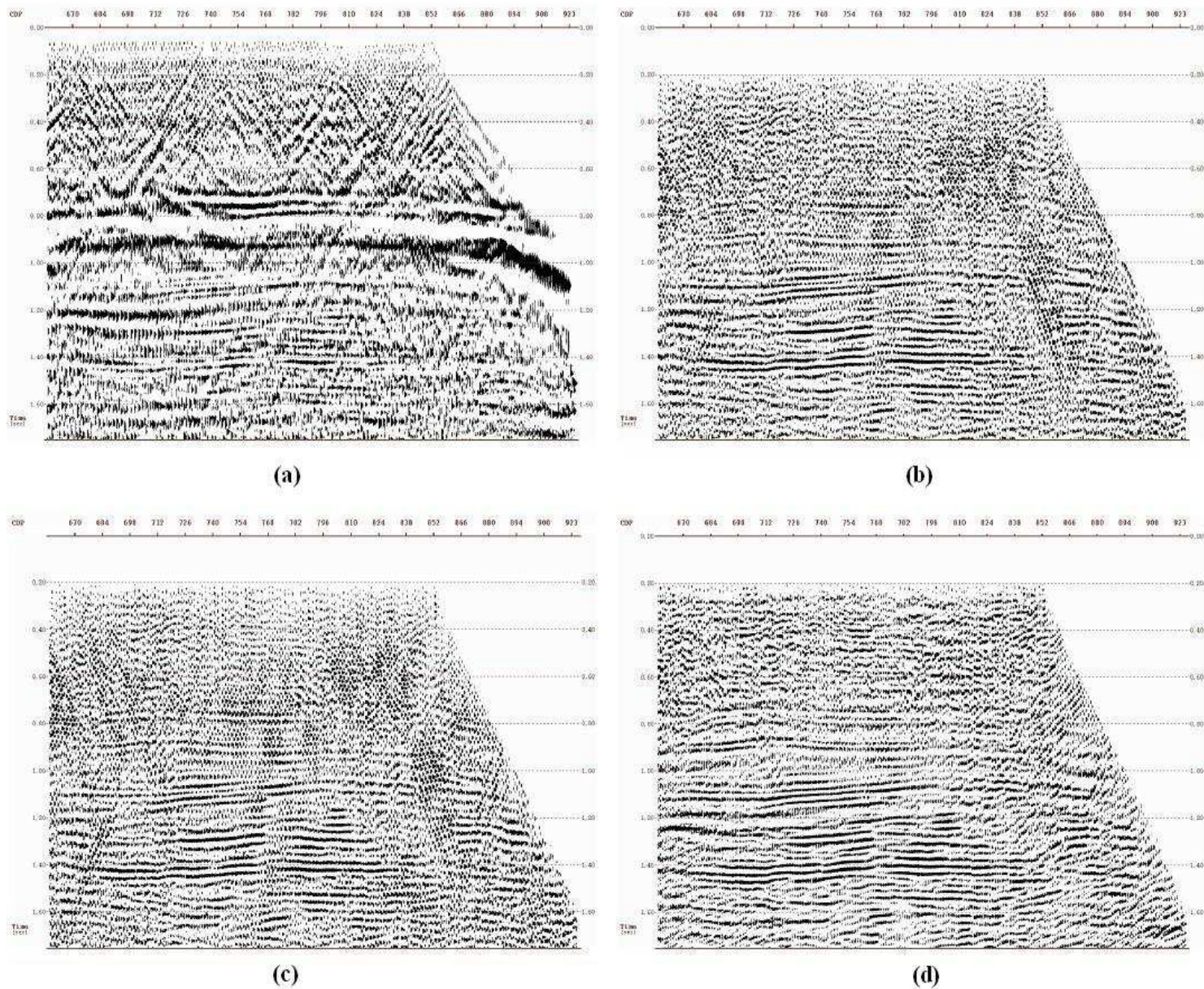


Figura 3.23: Intervalo destacado da seção empilhada bruta (a), com filtragem passa-alta (b), com a utilização do filtro f-k e com filtragem direcional 2D (d).

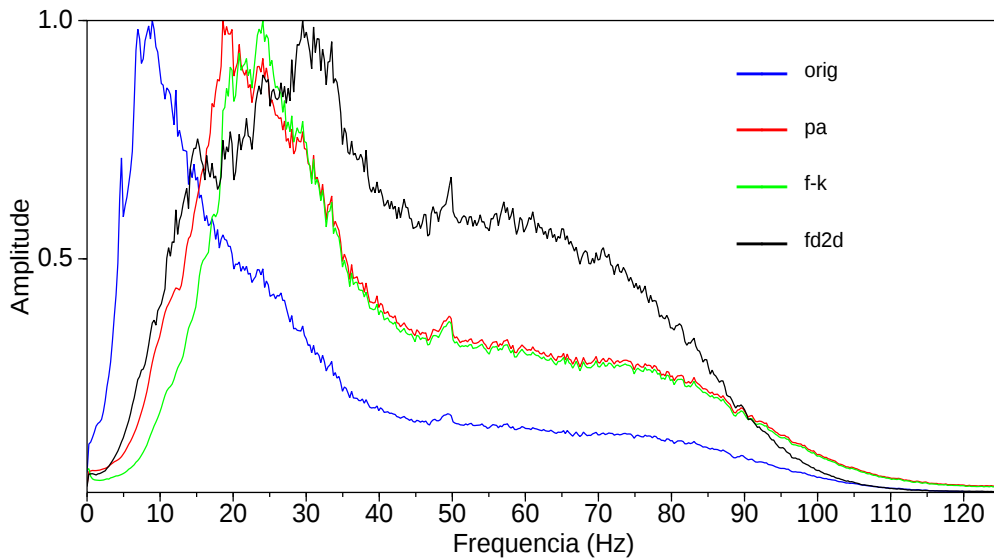


Figura 3.24: Comparação dos espectros de frequência das seções empilhadas bruta e com a aplicação dos diferentes métodos de filtragem.

3.3 Processamento da linha L5120 de um cubo sísmico da região do *Grane Field* (Mar do Norte)

3.3.1 Descrição dos dados

A linha L5120 é um *inline* de um dado sísmico 3D da região do *Grane Field*. A aquisição foi feita utilizando a técnica OBC (*Ocean Bottom Cable*), que consiste em fixar os hidrofones no assoalho oceânico. A lâmina d'água no local é rasa e tem um valor aproximadamente constante (120 m) (Landro, 2007).

A Figura 3.25 mostra o mapa com a localização da linha.

A linha encontra-se bastante contaminada com ruídos lineares. A origem dos ruídos está ligado às *head waves* (subseção 1.2.1) e, principalmente, pelos *harmonic modes* que tem o maior efeito contaminante (subseção 1.2.2).

As Figuras 3.26-(a) e 3.26-(b) mostram o efeito das *head waves* e do *harmonic modes* na linha.

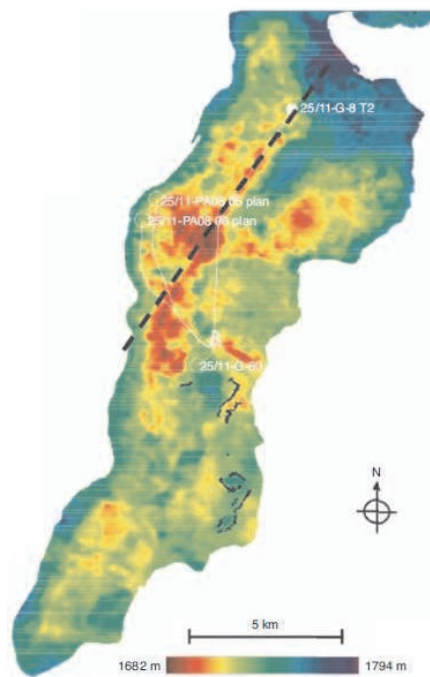


Figura 3.25: Mapa de profundidades com a localização da linha L5120. A linha interrompida indica a posição do *inline*

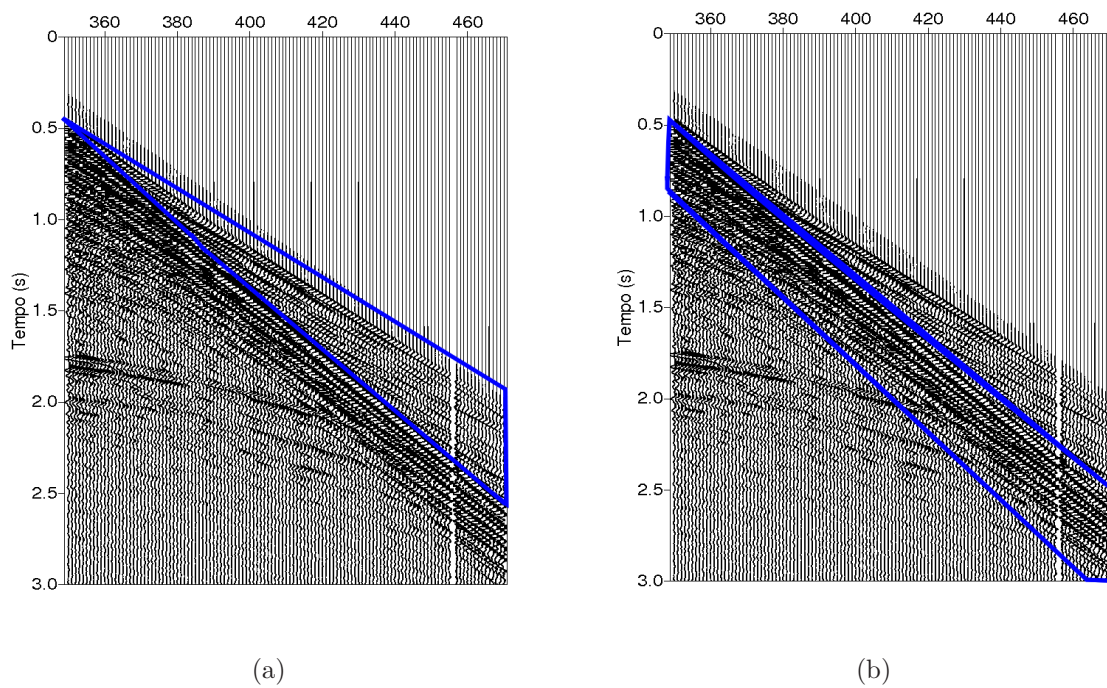


Figura 3.26: *Super Gather* mostrando as *head waves* em (a) e os *harmonic modes* em (b), ambos limitados pelo contorno em azul.

3.3.2 Processamento da linha L5120

Durante o processamento foi aplicado o *top mute* do *Focus*, afim de retirar os ruídos encontrados no topo dos sismogramas. As Figuras 3.27-(a) e 3.27-(b) mostram o espectro de amplitude na região das *head wave* e do *harmonic modes*, respectivamente.

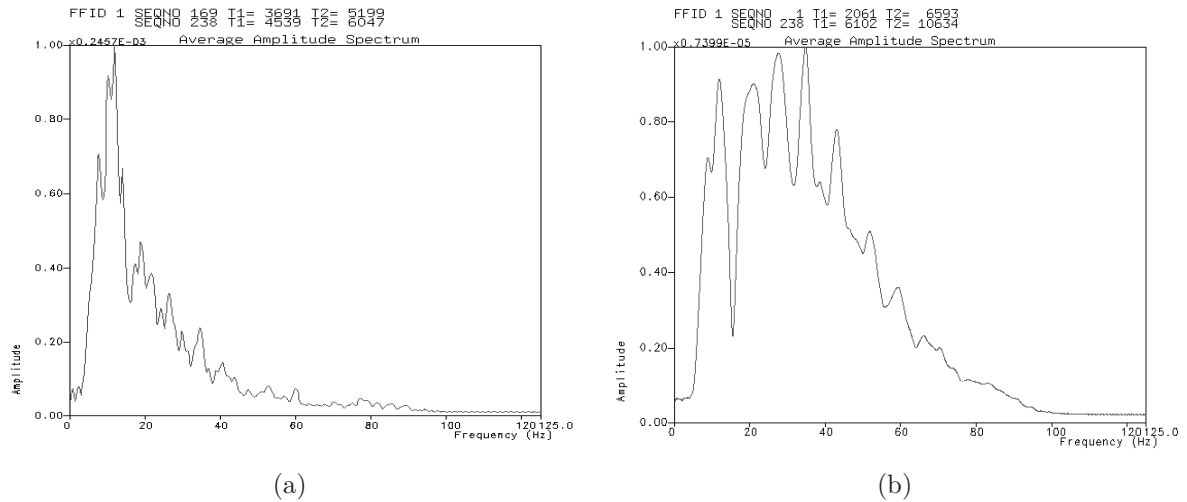


Figura 3.27: Figura demonstrando o espectro de amplitude para o *head wave* em (a), e para o *harmonic modes* em (b).

Não se torna aconselhável a utilização do filtro passa-alta unidimensional para atenuar tais ruídos, uma vez que esses eventos tem uma faixa de frequência ampla.

Um tratamento utilizando o método de filtragem f-k e a filtragem direcional 2D pode ser realizada uma vez que esses ruídos demonstram características lineares.

A Figura 3.28 mostra o resultado obtido utilizando a filtragem f-k.

Nota-se que o f-k obteve um bom resultado, porém ainda encontra-se uma parcela do ruído no dado.

Os espectros de amplitude dos ruídos mostram que a faixa de frequência onde se enquadram predominantemente tais eventos é elevada (entre 15 e 60 Hz), isso torna a filtragem direcional pouco eficaz para a atenuação do mesmo.

A Figura 3.29 mostra o resultado obtido com a aplicação do filtro de derivada direcional.

Não obtivemos sucesso na aplicação desse método. Esse resultado era esperado, uma vez que para altas frequências o filtro não consegue agir de maneira eficaz na estimativa da derivada.

Para contornar esse problema a derivada direcional foi aplicada usando-se o processo de horizontalização dos eventos. A Figura 3.30-(a) mostra os *harmonic modes* horizontalizados.

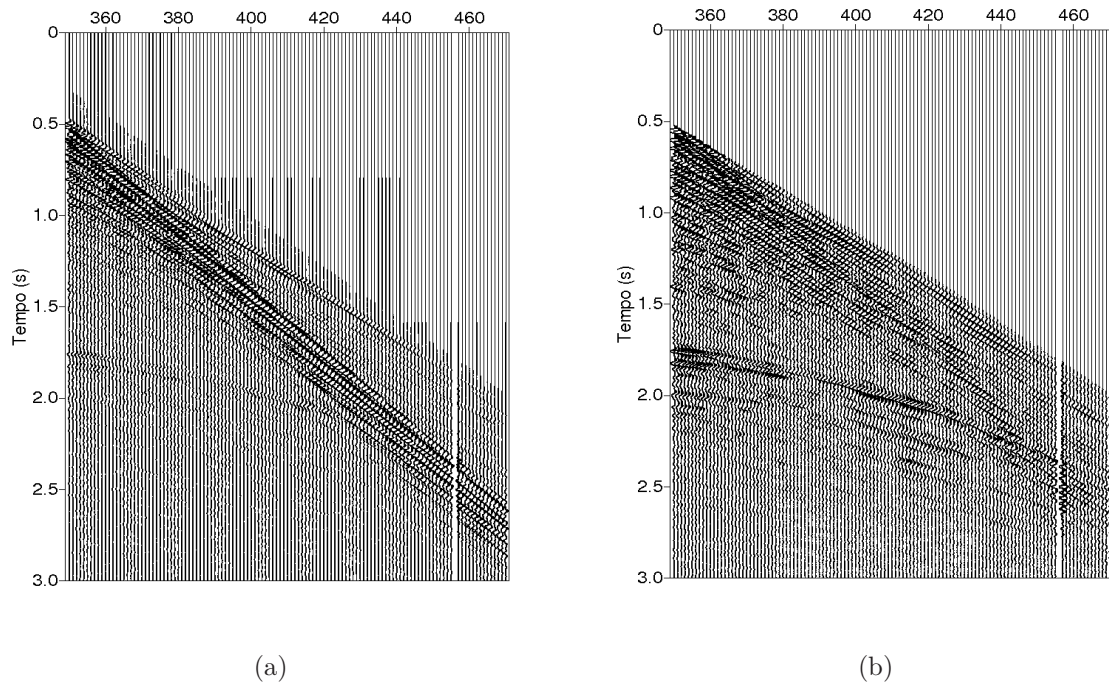


Figura 3.28: Cmp 100 mostrando o efeito da aplicação do filtro f-k nos dados. Em (a) temos os dados brutos e em (b) após a filtragem com o f-k.

A filtragem foi efetuada com uma velocidade bastante elevada, afim de atenuar todos eventos sub-horizantalizados. A Figura 3.31 demonstra o resultado obtido com a filtragem apenas dos modos harmônicos.

Para retirar o outro ruído (*head waves*) foi repetido o mesmo processo, porém horizontalizou-se as *head waves* e foi aplicado novamente o filtro. A Figura 3.32 mostra o resultado obtido com esse processo.

Percebe-se uma melhoria bastante significativa comparado aos dados brutos e aos dados filtrados com o f-k. As amplitudes dos ruídos foram atenuadas e as reflexões se tornaram mais destacadas. A resolução temporal teve uma melhoria significativa.

As Figuras 3.33, 3.34 e 3.35, mostram as seções empilhadas brutas, com a filtragem f-k e com a aplicação da derivada direcional.

Uma região da seção foi ampliada para os dois métodos de filtragem e está exposto na Figura 3.36.

Através da Figura 3.36, nota-se que foram revelados eventos anteriormente mascarados pelo ruído.

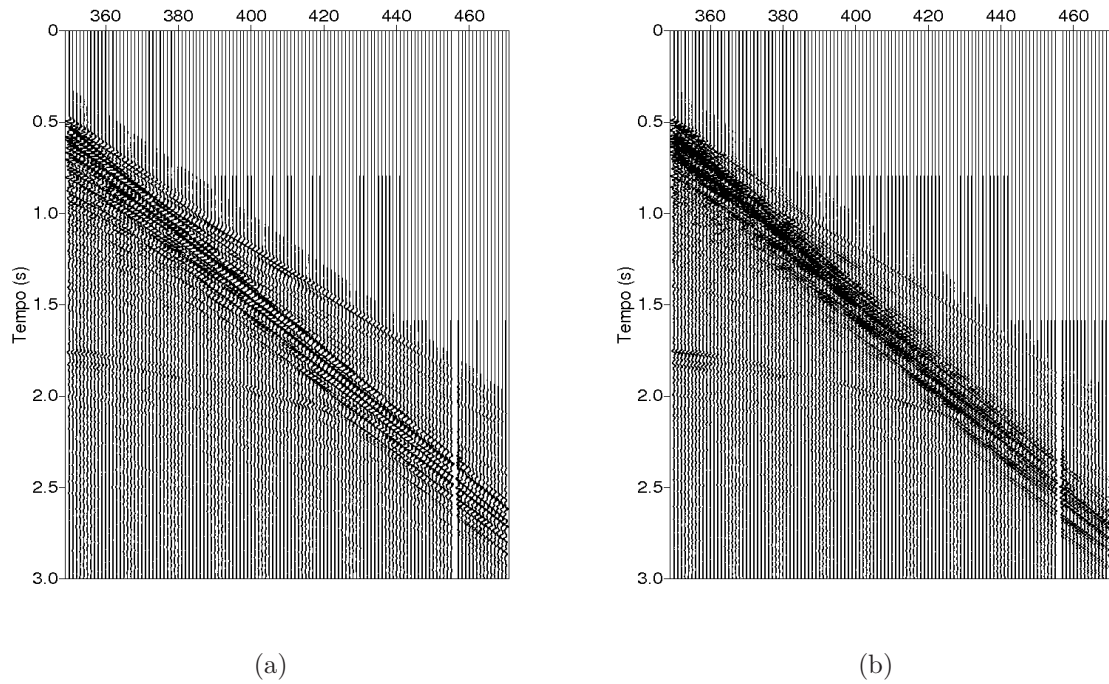
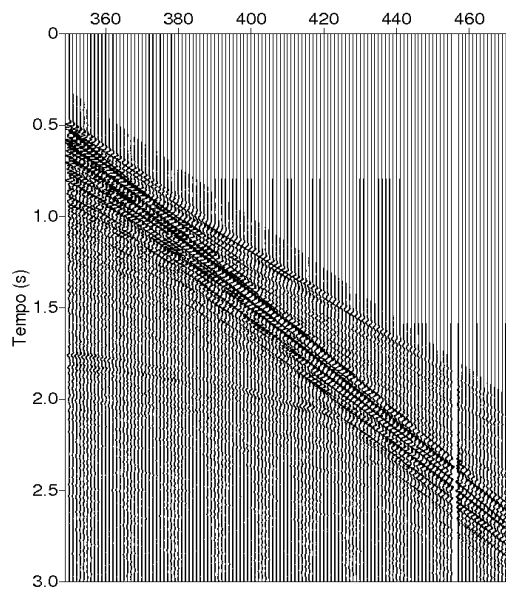
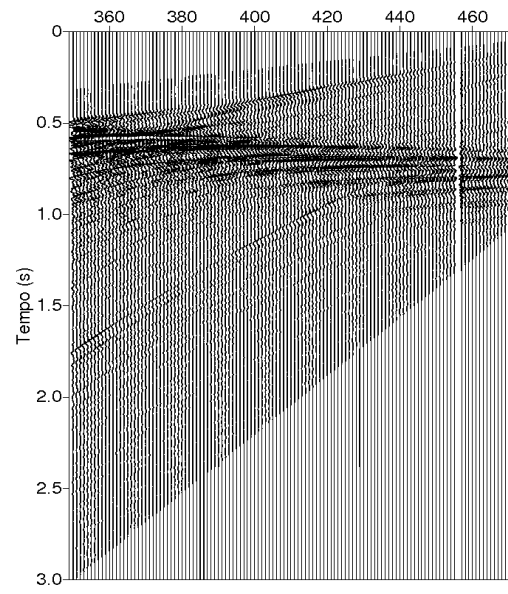


Figura 3.29: Cmp 100 mostrando o efeito da aplicação da derivada direcional 2D nos dados. Em (a) temos os dados brutos e em (b) após a filtragem.

A derivada direcional obteve um resultado superior comparado à filtragem f-k, os eventos tornaram-se mais bem definidos e com melhor resolução. Percebe-se que um ruído bastante mascarador encontra-se na seção bruta em forma de dois cones invertidos entre os tempos $t = 2.0$ s e $t = 6.0$ s (Figura 3.33), na seção filtrada com a derivada direcional 2D esse efeito foi bastante atenuado, revelando novas superfícies sísmicas (Figura 3.35).

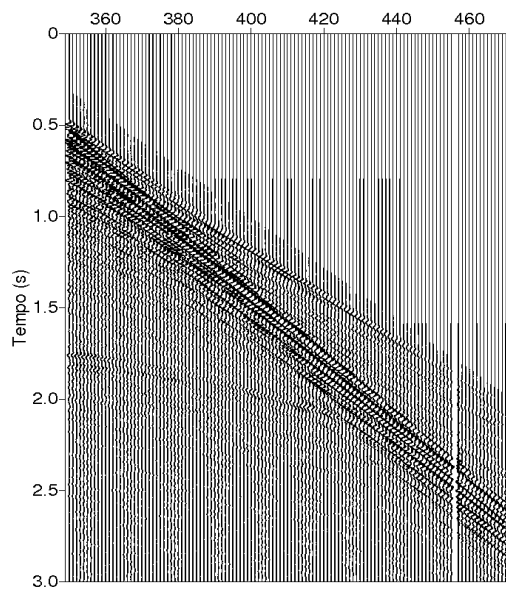


(a)

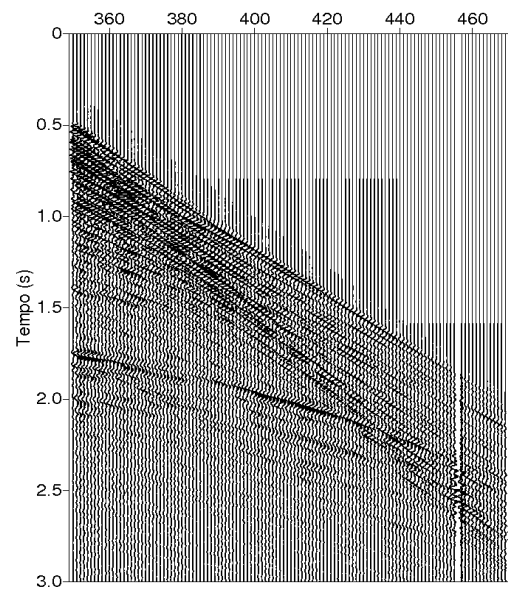


(b)

Figura 3.30: Figura mostrando os *harmonic modes* no cmp 100 antes da horizontalização em (a) e após em (b).



(a)



(b)

Figura 3.31: Cmp 100 bruto em (a) e após a filtragem com o processo de horizontalização dos *harmonic modes* em (b).

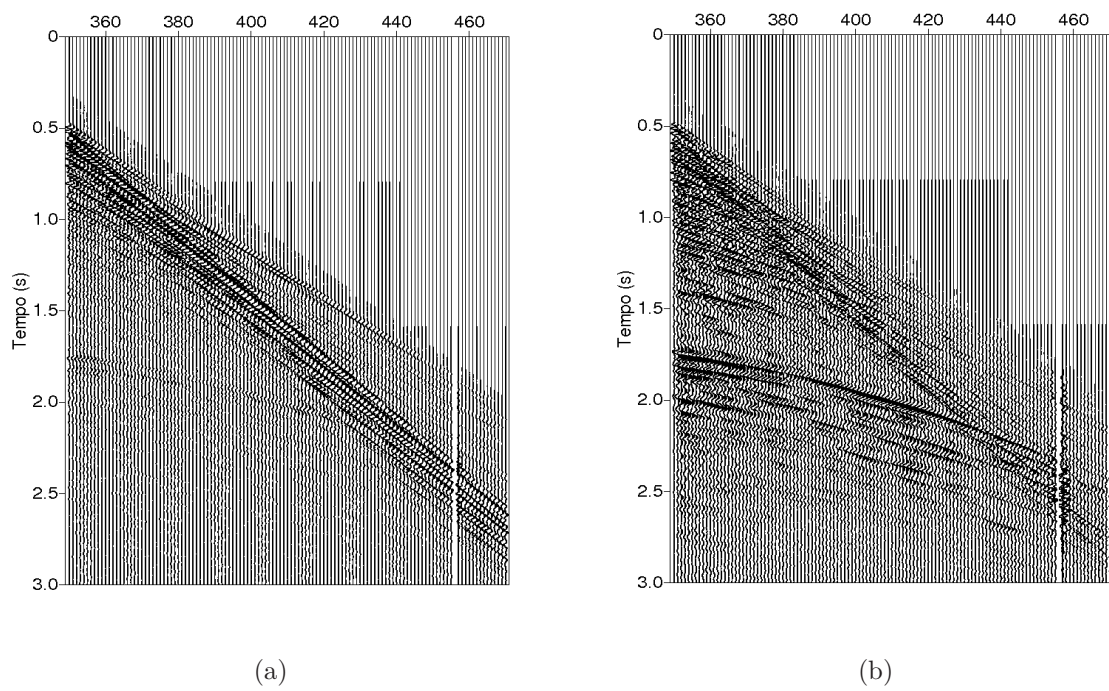


Figura 3.32: Cmp 100 bruto em (a) e após a filtragem com o processo de horizontalização das *head waves* em (b).

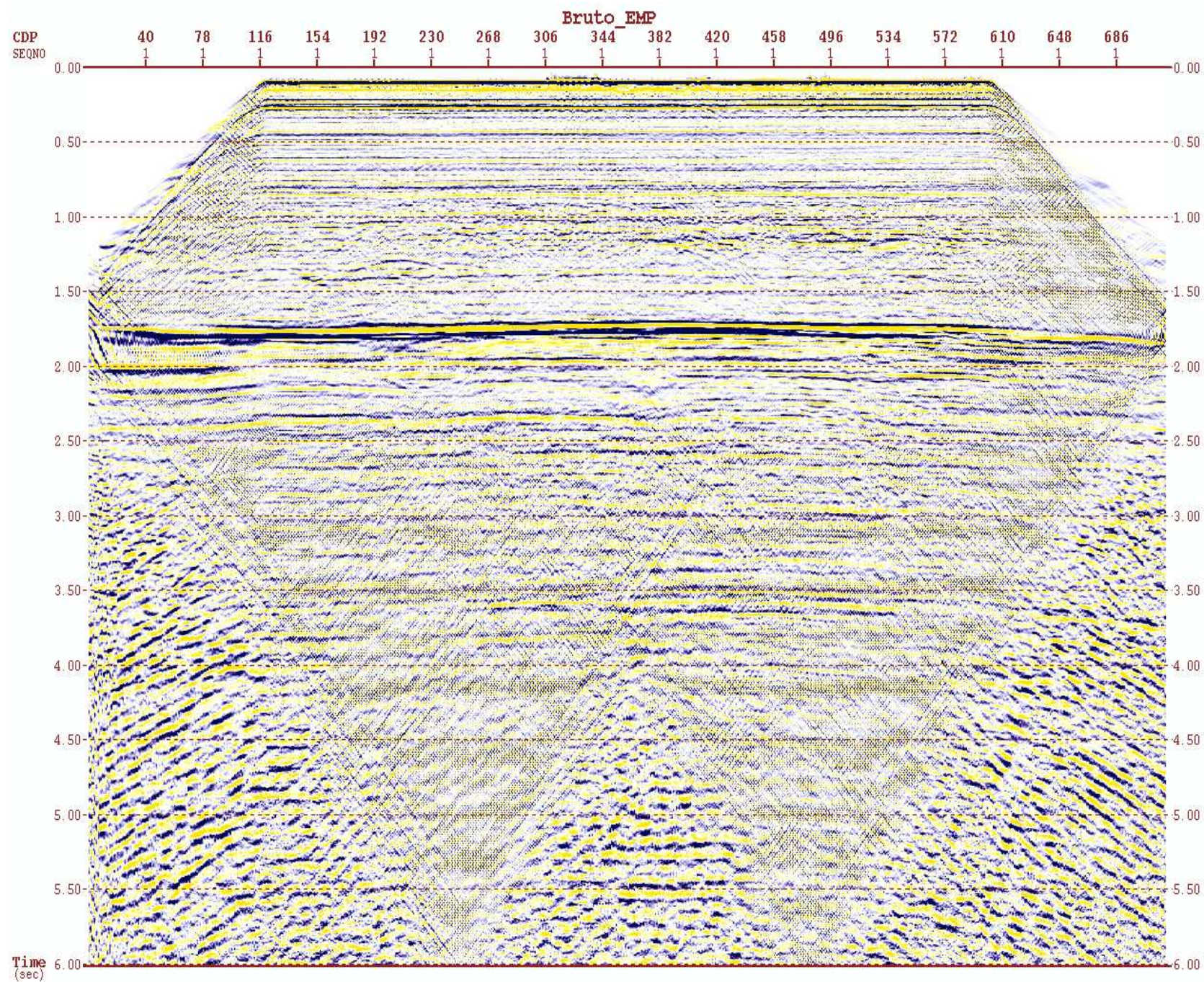


Figura 3.33: Seção empilhada bruta.

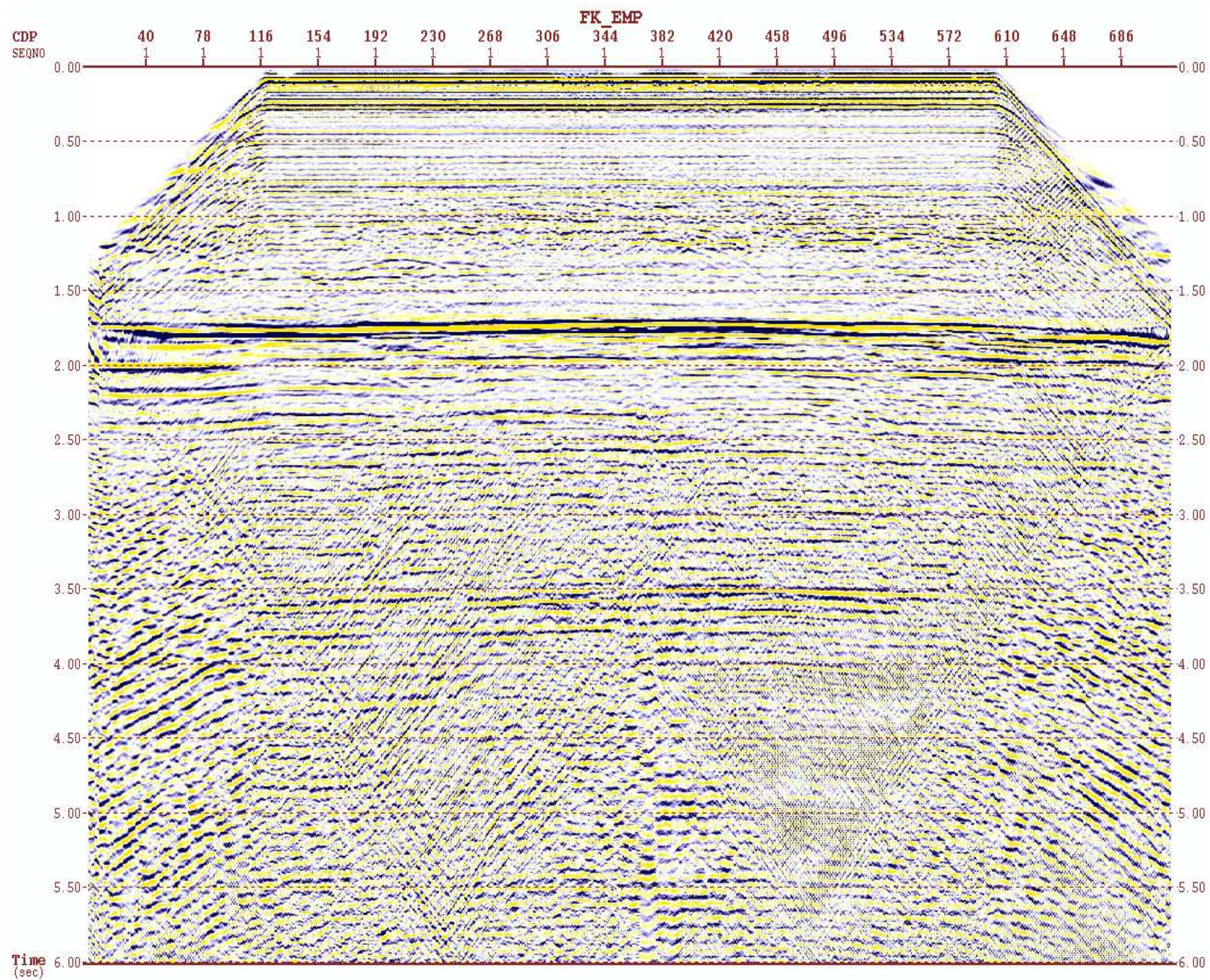


Figura 3.34: Seção empilhada com a filtragem f-k.

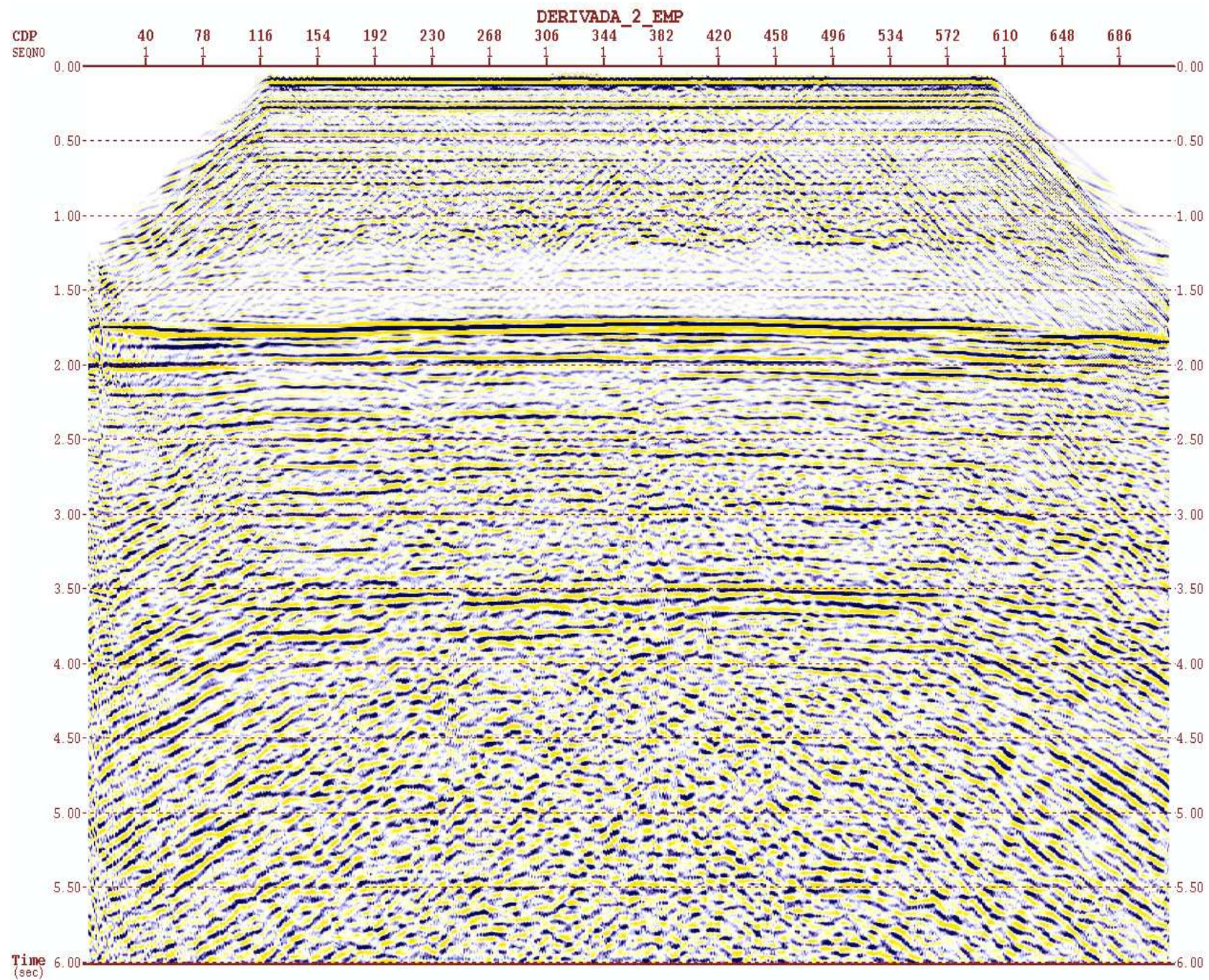


Figura 3.35: Seção empilhada utilizando o novo método de filtragem de derivada direcional com o auxílio do processo de horizontalização.

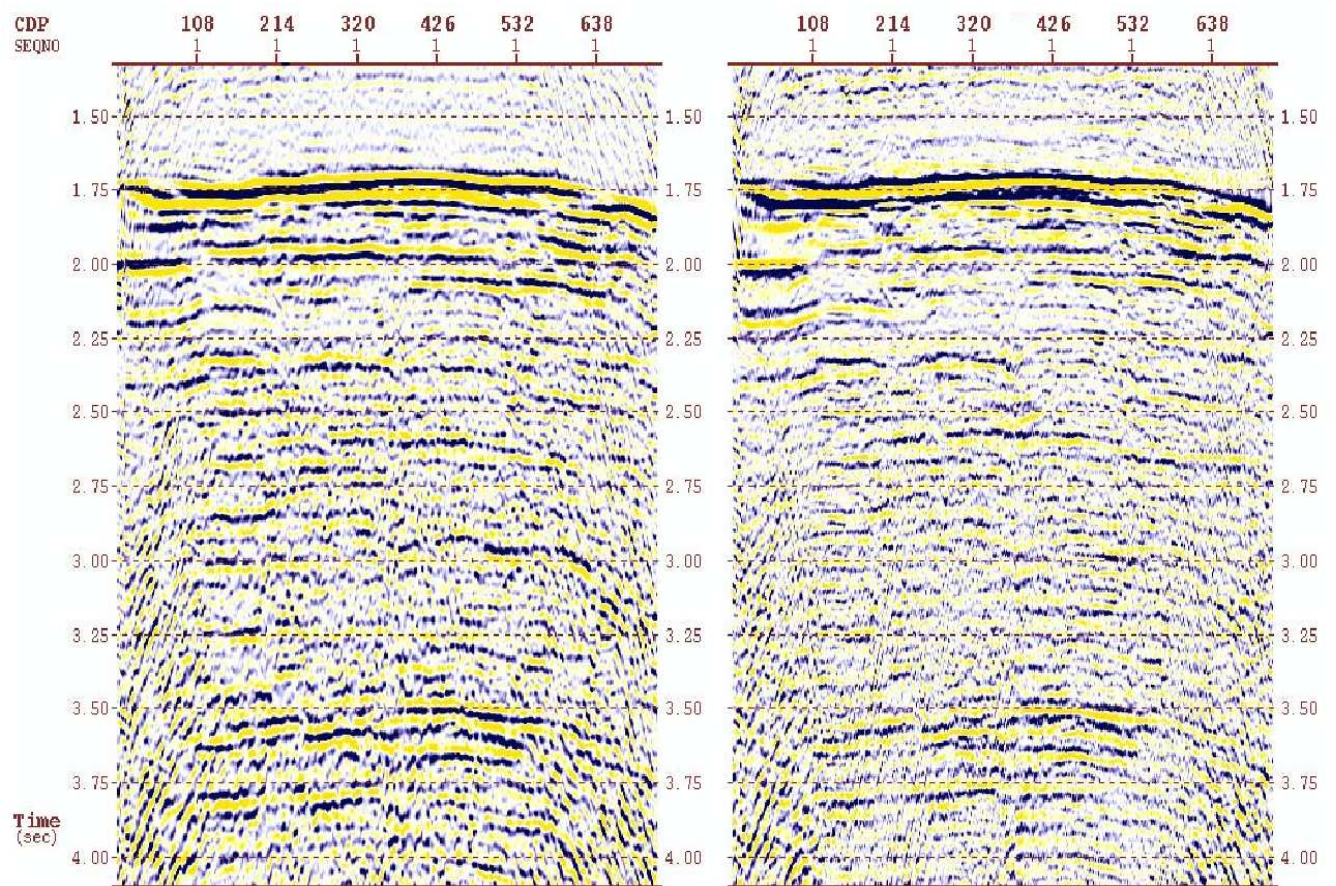


Figura 3.36: Seção empilhada com ampliação utilizando a filtragem f-k em (a), e com a derivada direcional em (b).

CONCLUSÕES

A presença de ruídos em seções sísmicas sempre foram de grande desafio para o processamento. Métodos alternativos de filtragem estão em constante desenvolvimento com o intuito de aumentar a relação sinal/ruído.

Um novo método de atenuação de ruídos lineares foi proposto, esse método calcula a derivada direcional através de um operador de dimensão 3×3 . O operador é calculado apenas uma vez e aplicado à toda matriz de dados em forma de convolução 2D, tornando o método bastante robusto e com um baixo custo computacional. O principal parâmetro de entrada é a velocidade do evento a ser filtrado.

Dados sintéticos foram utilizados para validar a eficácia do filtro. Os resultados alcançados foram satisfatórios para os dados sintéticos, porém com o aumento da frequência percebeu-se que o filtro fica limitado. Uma nova abordagem foi proposta para contornar esse problema. Horizontalizando-se os eventos antes do processo de filtragem, o operador se torna mais eficaz no cálculo da derivada direcional, encontrando agora a derivada na direção dos eventos sub-horizontalizados. A velocidade para a filtragem de eventos sub-horizontais deve ser muito elevada, o que seria equivalente a um ângulo θ de 90° .

O novo filtro foi aplicado em duas linhas, sendo uma da bacia do Tacutu (terrestre) e a outra da região de *Grane Field* (Mar do norte), de origem marinha. As linhas apresentavam ruídos lineares que prejudicavam a razão sinal/ruído. Na linha terrestre o *ground roll* era o principal ruído a ser eliminado, sendo que na marinha eram as *head waves* e as *harmonic modes*, ambas características de regiões marinhas de lâmina d'água rasa e *offsets* longos. O filtro se mostrou bastante eficaz para a atenuação do *ground roll* em relação aos métodos convencionais de filtragem (f-k e passa-alta), melhorando a resolução vertical e a continuidade lateral dos eventos.

Para a linha marinha, foi necessário a sub-horizontalização dos ruídos mergulhantes, pois os mesmos continham altas frequências. Com a sub-horizontalização, o filtro mostrou-se bastante eficaz apresentando um resultado superior ao método de filtragem no domínio f-k. A seção empilhada com o método de derivada direcional exibiu resultados animadores, melhorando significativamente a resolução temporal e espacial dos refletores.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus familiares, em especial minha mãe, meu pai e meus irmãos, pois sem eles nada disso seria possível. Agradeço muito às fiéis amizades que conquistei ao longo de minha vida. À todos da turma de 2006, em especial meus amigos inseparáveis de curso, Luite e Vidal. À Jacira, professora, mãe e amiga.

Agradecimento especial ao professor Milton Porsani pela paciência, compreensão, ensinamentos e por acreditar em mim enquanto estudante. À todos os professores que possibilitaram de alguma forma o ensino de qualidade que obtive durante o curso. À Michelangelo, Enock e Paulo Espinheira que sempre estiveram dispostos a me ajudar.

Gostaria de agradecer também aos patrocinadores do projeto *Grane* (*StatoilHydro*, *Petoro*, *ExxonMobil* e *ConocoPhillips*), por cederem os dados e permitirem a publicação dos resultados. À Martin Landro, por dar suporte às informações do *Grane Field*. À ANP e PIBIC/CNPq pelo financiamento em forma de bolsa de estudos, ao LAGEP e CPPG/UFBA pela estrutura física de qualidade oferecida. À *Paradigm* pela disponibilização do *software* - *Focus*. À Brahim pelo desenvolvimento do *software*, programa com o qual gera dados sintéticos, utilizado nesse trabalho.

APÊNDICE A

Dedução da equação 1.5

A partir da equação 1.5, percebemos que as contribuições de dois modos vizinhos (n e $n + 1$) podem ser dados por:

$$S_2(w) = P(w) \left[\frac{e^{iw(d_n/v)}}{d_n} - \frac{e^{iw(d_{n+1}/v)}}{d_{n+1}} \right]. \quad (\text{A.1})$$

Se assumirmos que $d_n \approx d_{n+1}$ teremos

$$S_2(w) = P(w) \frac{e^{iw(d_n/v)}}{d_n} [1 - e^{\frac{iw(d_{n+1}-d_n)}{v}}]. \quad (\text{A.2})$$

A norma de S_2 é encontrada multiplicando a expressão entre colchetes na equação (A.2) com o complexo conjugado, $[1 + e^{\frac{iw(d_{n+1}-d_n)}{v}}]$. Efetuando a correspondente multiplicação obtemos $2 - 2\cos w(d_{n+1} - d_n)/v$, significando que o valor absoluto do termo será $\sin w(d_{n+1} - d_n)/2v$. Fazendo a mesma dedução para a interferência construtiva (n e $n + 2$) obtemos $\cos w(d_{n+2} - d_n)/2v$. Isto implica que a interferência mínima irá ocorrer quando o argumento da função for igual ou múltiplo de π , ou seja,

$$\begin{aligned} \frac{2\pi f(d_{n+2} - d_n)}{2v} &= m\pi, \\ m &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Utilizando d_{n+1} e d_n na equação (1.3) obtemos

$$f = \frac{mv}{\sqrt{x^2 + 4(n+1)^2 z^2} - \sqrt{x^2 + 4n^2 z^2}}. \quad (\text{A.4})$$

Utilizando a expansão de Taylor no denominador, assumindo que $8nz^2 \ll (x^2 + 4n^2 z^2)$, obtemos

$$f \approx \frac{mv\sqrt{x^2 + 4n^2 z^2}}{4nz^2}. \quad (\text{A.5})$$

Para $m=1$ e $x \gg nz$, essa equação reduz para

$$f \approx \frac{vx}{4nz^2}. \quad (\text{A.6})$$

A interferência máxima irá ocorrer para combinações de n e $n+2$. Considerações e deduções mais rigorosas, além de um tratamento mais compreensivo dos *harmonic modes* em uma lâmina d'água, podem ser encontrados em Press e Ewing, 1950.

Referências Bibliográficas

- Anstey, N. (1986) *Whatever happened to ground roll? The Leading Edge* **5**: 40-46.
- Landro, M. (2007) *Attenuation of seismic water-column noise, tested on seismic data from the Grane field, Geophysics*, **72**: 87-95.
- Meersman, K. e Ansorger, C. (2007) *Ground Roll Removal and Signal Preservation by Cascading SVD Polarization Filters with Localized Fk-Filters*, CSPG CSEG Convention.
- Melo, P. E. M. (2007) *Novos métodos para filtragem de dados sísmicos de reflexão*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia.
- Melo, P. E. M.; Porsani, M. J. e Silva, M. G. (2009) *Ground roll attenuation using a 2D time derivative filter. Geophysical Prospecting* , **57**:343-353.
- Newman, P. e Mahoney, J. T. (1973) *Patterns - with a pinch of salt, Geophysical Prospecting*, **21**:197-219.
- Porsani, M. J.; Melo, P. E. M. e Silva, M. G. (2007) *Ground roll attenuation using a 2D time-derivative filter*.
- Press, F., e M. Ewing, (1950) *Propagation of explosive sound in a liquid layer overlaying a semi-infinite elastic solid, Geophysics*, **15**: 426-446.
- Pritchett, W. (1991) *System design for better seismic data. The leading Edge* **11**: 33-35.
- Santos, Q. C. (2007) *Atenuação do ground roll utilizando filtro não causal tipo Wiener-Levinson*, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Shepard, D. (1968) *A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data, Proc. 23rd. nat. Conf. ACM Brandon/Systems Press Inc., Princeton*, pp. 517-523.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) *Applied Geophysics, Cambridge Un. Press, Cambridge*.
- Yilmaz, O. (2001) *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa*.

ANEXO I

Subrotina que horizontaliza eventos mergulhantes

```
subroutine  horizon_f(n,is,m,nx,nz,P,Pout9)

!-----
!   Horizonlatiza eventos lineares e mergulhantes para diversas condicoes
!   de posicoes de fonte.
!   O único parâmetro de entrada "m" e a distancia (em amostras) entre
!   maximos de amplitudes consecutivos (detectavel pelo sismograma).
!   Parametros de entrada: n,is,m,nx,nz,P
!   Parametro de saida: Pout9
!
!   is=posicao da fonte
!   m= distancia entre maximos
!   nz=numero total de amostras em um traco
!   nx=numero total de tracos
!   P= matriz de dados
!   Pou9= Matriz horizontalizada
!
!   AUTOR: Vinicius Queiroz de Oliveira /UFBA
!   DATA: 06/05/2009
!
!-----
      dimension P(nz,nx), Pout9(nz,nx)

      if(is.gt.1.and.is.lt.nx)then! fonte entre os extremos

!-----
!   A matriz entra invertida.
!   Zera de 1 ate um traco antes de is.
!
!
      if (n.eq.1) then
        do j=1,nx-is
          do i=1,nz
            Pout9(i,j) = 0.0
          enddo
        enddo
      enddo
!-----
```

```

!-----
!  Preserva o traco da fonte(referencial)
!
      do i=1,nz
        Pout9(i,nx-is+1) = P(i,nx-is+1)
      enddo
!-----

!-----
!  Horizontaliza apos a fonte
!
!
      do j=nx-is+2,nx
        do i=1,nz - m*(j-(nx-is+2)+1)
          Pout9(i,j) = P(m*(j-(nx-is+2)+1)+i,j)
        enddo
        do i= (nz - m*(j-(nx-is+2)+1))+1 ,nz
          Pout9(i,j) = 0.0
        enddo
      enddo
!-----

endif

!-----
!  A matriz entra normal.
!  Zera os atracos a partir de 1 ate is
!
      if (n.eq.2) then
        do j=1,is
          do i=1,nz

            Pout9(i,j) = 0.0

          enddo
        enddo
!-----
!  Preserva o primeiro traco apos is(referencial)
!
      do i=1,nz
        Pout9(i,is+1)=P(i,is+1)
      enddo
!-----

!-----
!  Horizontaliza a partir de is+2
!
!
      do j=is+2,nx
        do i=1,nz-m*(j-(is+2)+1)
          Pout9(i,j) = P(m*(j-(is+2)+1)+i,j)
        enddo

        do i= (nz - m*(j-(is+2)+1))+1 ,nz
          Pout9(i,j) = 0.0
        enddo
      enddo

```

```

endif
!-----

!-----
! Caso onde a fonte se encontra nos extremos
!
else
!-----

!-----
! Mantem o primeiro traco (referencial)
!
do i=1,nz
    Pout9(i,1) = P(i,1)
enddo
!-----

!-----
! Horizontaliza a partir do segundo traco
! OBS.: Quanfo for gravar caso a matriz tenha sido lido invertada, ela
! sera grava invertida novamente para reconstituir a original
!
do j=2,nx
    do i=1,nz - m*(j-1)
        Pout9(i,j) = P(m*(j-1)+i,j)
    enddo

    do i= (nz - m*(j-1))+1 ,nz
        Pout9(i,j) = 0.0
    enddo
enddo

endif
!-----

return
end

```

ANEXO II

Subrotina que retira o efeito de horizontalização nos eventos mergulhantes

```
subroutine horizon_b(n,is,m,nx,nz,P,Pout,Pout2,AA,BB)
!-----
! Retira o efeito de horizontalizacao dos eventos linearmentes inclinados
! para diversas condicoes de posicoes de fonte.
! O parametro de entrada é o mesmo valor "m" usado durante a horizontalizacao.
!
! Parametros de entrada: n,is,m,nx,nz,P
! Parametro de saida: Pout2
!
! is=posicao da fonte
! m= distancia entre maximos
! nz=numero total de amostras em um traco
! nx=numero total de tracos
! P= matriz de dados original (necessaria para repor algumas amostras)
! Pout= matriz filtrada (obtida atraves da derivada)
! Pout9= Matriz horizontalizada
! Pout2= Matriz reconstituída e filtrada
!
!
! AUTOR: Vinicius Queiroz de Oliveira / UFBA
!
! DATA: 08/05/2009
!-----
      Dimension Pout(nz,nx),Pout2(nz,nx),P(nz,nx),AA(nz,nx),BB(nz,nx)

      if(is.gt.1.and.is.lt.nx)then! caso em que a fonte encontra-se entre os extremos
!-----
! Com a matriz invertida, tira a horizontalizacao somente a partir
!do primeiro traco apos a fonte.
!

      if (n.eq.1) then
        do j=nx-is+2,nx
          do i=1,nz - m*(j-(nx-is+2)+1)

            Pout2(i + m*(j-(nx-is+2)+1),j) = Pout(i,j)

          enddo
          do i=1, m*(j-(nx-is+2)+1)
            Pout2(i,j) = P(i,j)
          enddo
        enddo
      enddo
```

```

!-----
!-----
! Zera os tracos do canal 1 ate um traco antes da fonte
!
      do j=1,nx-is
        do i=1,nz
          Pout2(i,j) = 0.0
        enddo
      enddo
!-----
!-----
! Preserva o traco da fonte (referencial)
!
      do i=1,nz
        Pout2(i,nx-is+1)= Pout(i,nx-is+1)
      enddo
!-----
!-----
!Salva resultado parcial na matriz AA
!
      do j=1,nx
        do i=1,nz
          AA(i,j) = Pout2(i,nx-j+1)
        enddo
      enddo

      endif
!-----
!-----
! Com a matriz normal, tira a horizontalizacao a partir do segundo traco
! apos is.
!
      if (n.eq.2) then
        do j=is+2,nx
          do i=1,nz - m*(j-(is+2)+1)
            Pout2(i + m*(j-(is+2)+1),j) = Pout(i,j)

            enddo
          do i=1, m*(j-(is+2)+1)
            Pout2(i,j) = P(i,j)
          enddo
        enddo
!-----
! Zera do canal 1 ate o is
!
      do j=1,is
        do i=1,nz
          Pout2(i,j) = 0.0
        enddo
      enddo
!-----

```

```

!-----
! Preserva o primeiro canal apos a fonte(referencial)
!
      do i=1,nz
        Pout2(i,is+1) = Pout(i,is+1)
      enddo
!-----

!-----
! Grava o segundo resultado parcial na matriz BB
!
      do j=1,nx
        do i=1,nz
          BB(i,j) = Pout2(i,j)
        enddo
      enddo
!-----

! Soma AA com BB e obtem a matriz Pout2
!
      do j=1,nx
        do i=1,nz
          Pout2(i,j) = AA(i,j) + BB(i,j)
        enddo
      enddo

    endif
!-----

    else !segundo caso onde a fonte encontra-se nos extremos

!-----
! O primeiro traco se mantem.
! Caso seja a condicao onde a fonte se encontra nx, a matriz sera
! lida de forma invertida, tendo assim o mesmo processo para tirar o efeito.
!
      do i=1,nz
        Pout2(i,1) = Pout(i,1)
      enddo
!-----

!-----
! Tira a Horizontalizacao a partir do segundo traco
!
      do j=2,nx
        do i=1,nz - m*(j-1)

          Pout2(i + m*(j-1),j) = Pout(i,j)

        enddo
        do i=1, m*(j-1)
          Pout2(i,j) = P(i,j)
        enddo
      enddo
!-----

    endif

  return
end

```