



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

A INFLUÊNCIA DA DECONVOLUÇÃO NA FILTRAGEM SRME

LAILA DANTAS LEITE VERGNE

SALVADOR – BAHIA

Setembro – 2017

A Influência da Deconvolução na Filtragem SRME

por

LAILA DANTAS LEITE VERGNE

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Milton José Porsani

Me. Wilker Eduardo Souza

Dr. Michelangelo G. da Silva

DATA DA APROVAÇÃO: 08/09/2017

Dedico esse trabalho a todas as
pessoas que contribuíram para meu
sucesso e para meu crescimento
como pessoa. Sou o resultado da
confiança e da força de cada um de
você.

Resumo

Com os métodos de deconvolução foi possível alcançar o objetivo de delimitar as reflexões obtidas pelo sismograma, melhorando a resolução temporal. Utilizou-se as seguintes deconvoluções: deconvolução de Wiener convencional (*spike*), deconvolução adaptativa e a deconvolução com norma L_p . Dentre as deconvoluções utilizadas foi estabelecido qual delas apresentou o melhor resultado após a aplicação do método de filtragem SRME no fluxograma de processamento sísmico, onde os efeitos das múltiplas de superfície devem ser suavizados nos dados marítimos da Bacia de Jequitinhonha, possibilitando a obtenção de uma seção sísmica mais próxima da realidade geológica em subsuperfície da área em estudo.

Abstract

Using the methods of deconvolution it was possible to reach the objective of delimiting the reflections obtained by the seismogram, improving the temporal resolution. The following deconvolutions were used: Wiener deconvolution (spike), adaptive deconvolution, and L_p norm deconvolution. Among the deconvolutions used, it was established which one showed the best result after application of the SRME filtering method in the seismic flow, where the effects of the surface multiple should be smoothed in the marine data of the Jequitinhonha Basin, making it possible to obtain a better seismic section closer to the subsurface geological reality of the study area.

Sumário

Resumo	3
Abstract	4
Introdução	11
1 Fundamentação Teórica	13
1.1 Método dos Mínimos Quadrados	13
1.1.1 Conceitos básicos	13
1.1.2 Filtro de mínimos quadrados	14
1.1.3 <i>Wavelet spiking</i> e a distribuição de energia	18
1.2 Deconvolução <i>Spike</i>	20
1.2.1 Filtro inverso de um pulso conhecido	22
1.2.2 Filtro de Wiener	23
1.3 Deconvolução com norma L_p	25
1.3.1 Etapas do algoritmo DL_p	27
1.4 Deconvolução Adaptativa	28
1.4.1 Ajanelamento com zeros fora da janela	29
1.4.2 Deconvolução adaptativa monocanal	29
1.4.3 Deconvolução adaptativa multicanal	31
1.5 Atenuação de Múltiplas	31
1.5.1 Múltiplas	31
1.5.2 Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície - (<i>Surface Related Multiple Elimination</i>) - SRME	32
2 Metodologia	39
2.1 Localização e geologia	39
2.2 Geometria de aquisição	43
2.3 Fluxograma do processamento	43

2.3.1	Conversão de formato	44
2.3.2	Geometria	44
2.3.3	Edição	45
2.3.4	Deconvoluções	45
2.3.5	Análise de velocidade da múltipla - MMO	47
2.3.6	<i>Surface related multiple elimination</i> - SRME	47
2.3.7	Análise de velocidade final	51
2.3.8	Seção empilhada	53
3	Resultados	55
3.1	Deconvolução	55
3.1.1	Influência no Espectro de Amplitude	61
3.2	<i>Surface Related Multiple Elimination</i> - SRME	63
3.3	Influência das filtragens no espectro de velocidades	74
3.4	Empilhamento	79
4	Conclusões	85
	Agradecimentos	87
	Referências	88

Lista de Figuras

1.1	(A) <i>Wavelet</i> de fase mínima, (B) <i>wavelet</i> de fase mista e (C) de fase máxima.	19
1.2	Modelo de convolução do traço sísmico pela convolução do pulso com a função refletividade. Adaptado de Kearey e Brooks (1991).	21
1.3	Filtragem adaptativa monocanal usando uma janela móvel deslizante de comprimento $M = 3$ em amostras. Adaptado de Oliveira et al. (2014).	30
1.4	Nas reflexões primárias as ondas sofrem apenas uma reflexão ascendente. (a) Múltipla com apenas uma reflexão descendente e (b) outro tipo de múltipla com duas reflexões descendentes.	32
1.5	A trajetória da onda associada a múltipla de superfície livre.	32
1.6	A múltipla de primeira ordem pode ser representada pela combinação de duas primárias, conectadas entre si por um ponto de reflexão na superfície (Verschuur, 2006).	33
1.7	Remoção das múltiplas de superfície a partir da autoconvolução da resposta total. Em (a) resposta com duas primárias e todas as múltiplas. Em (b) a primeira múltipla é predita, obtida pela autoconvolução da resposta total. (c) A múltipla de segunda ordem é predita, obtida a partir da convolução da múltipla de primeira ordem com a resposta total. (d) A múltipla de terceira ordem. (e) O dado sem múltiplas de superfície, obtido pela soma da resposta com as predições de (a) e (d) (Verschuur, 2006).	36
1.8	Uma múltipla de superfície de primeira ordem é construída por meio da combinação de uma família de tiro comum do dado P com uma família de receptor comum da resposta primária X_o . Essas famílias são convolidas uma com a outra e somadas afim de se obter a múltipla predita (Verschuur, 2006).	37
1.9	Estruturação das matrizes de dados (Verschuur, 2006).	38
1.10	Notação matricial para estruturação do dado pré-empilhado $P(x_r, x_s, f)$ na matriz \mathbf{P} . Em (b) mostra a predição de múltiplas sendo descrita com uma multiplicação de matrizes (Verschuur, 2006).	38

2.1	Ponto vermelho identificando a localização da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha. Fonte: ANP(2011).	40
2.2	A linha vermelha indica o local do levantamento da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha. Fonte: ANP(2011)	40
2.3	A linha vermelha indica o local do levantamento da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha representada agora em maior escala. Fonte: ANP(2011)	41
2.4	Seção Geológica da Bacia de Jequitinhonha. Fonte: CPRM(2011)	42
2.5	Fluxograma adotado para o processamento sísmico.	44
2.6	Fluxo adotado para montagem da geometria no <i>Seispace</i>	45
2.7	Fluxo adotado para a aplicação da deconvolução no <i>Seispace</i>	46
2.8	a) Modelo simples onde a fonte secundária (em laranja) está dentro do arranjo. b) Modelo complexo onde a fonte secundária (em laranja) está fora do arranjo e assim o caminho inicial (azul) não é medido.	49
2.9	a) Quando o arranjo é do tipo <i>end-on</i> , os <i>offsets</i> do dado original, indicado pela área de cinza, precisam ser extrapolados para além do <i>zero-offset</i> . b) A área azul indica os dados medidos. A área azul claro indica os dados que podem ser obtidos pelo princípio da reciprocidade. A área em rosa indica os dados extrapolados até o <i>zero-offset</i> . Para a predição de múltiplas a área em vermelho tracejada é suficiente (Verschuur, 2006).	49
2.10	Fluxo adotado para a aplicação do SRME no <i>Seispace</i>	51
2.11	Espectro de velocidades calculado a partir de medidas de coerência do CMP 2975 do dado bruto no <i>Seispace</i>	52
2.12	Fluxo adotado para a análise de velocidade no <i>Seispace</i>	52
2.13	Fluxo adotado para o empilhamento no <i>Seispace</i>	53
2.14	Campo de velocidade suavizado obtido a partir da etapa de análise de velocidade.	54
3.1	Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução <i>spiking</i> aplicada pela linguagem FORTRAN.	57
3.2	Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução <i>spiking</i> aplicada pelo <i>software Seispace</i>	58
3.3	Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução com norma L_p	59
3.4	Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução adaptativa.	60
3.5	Espectro de amplitude do dado bruto.	61
3.6	Espectro de amplitude da deconvolução <i>spike</i> desenvolvida no FORTRAN.	61
3.7	Espectro de amplitude da deconvolução adaptativa desenvolvida no FORTRAN.	62

3.8	Espectro de amplitude da deconvolução com norma L_p desenvolvida no FORTRAN.	62
3.9	Espectro de amplitude da deconvolução spike desenvolvida no Seisspace. . .	62
3.10	Primeiras etapas da filtragem SRME.	63
3.11	Ultimas etapas da filtragem SRME.	64
3.12	Região da seção sísmica empilhada usada para realizar a comparação entre as deconvoluções e a filtragem SRME	65
3.13	Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução do <i>Seisspace</i>	66
3.14	Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução <i>spiking</i> no FORTRAN.	67
3.15	Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução adaptativa.	68
3.16	Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução com norma L_p	69
3.17	Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução <i>spiking</i> do <i>Seisspace</i>	70
3.18	Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução <i>spiking</i> no FOTRAN.	71
3.19	Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução adaptativa monocanal.	72
3.20	Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução com norma L_p	73
3.21	Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução no PRO-MAX e da filtragem SRME.	75
3.22	Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução <i>spiking</i> no FORTRAN e da filtragem SRME.	76
3.23	Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução adaptativa e da filtragem SRME.	77
3.24	Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução com norma L_p e da filtragem SRME.	78
3.25	Seção sísmica bruta empilhada utilizando a velocidade da múltipla de superfície livre.	80
3.26	Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida pelo PRO-MAX e filtrada de SRME.	81

3.27	Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida utilizando a deconvolução <i>spiking</i> no FORTRAN e filtrada de SRME.	82
3.28	Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida utilizando a deconvolução adaptativa no FORTRAN e filtrada de SRME.	83
3.29	Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida utilizando a deconvolução com norma L_p no FORTRAN e filtrada de SRME.	84

Introdução

A geofísica é a ciência que estuda a Terra a partir das suas propriedades físicas. As medidas são tomadas na sua superfície, com o objetivo de investigar o seu interior. O método sísmico possui ampla aplicação na geofísica, entre elas destaca-se a procura por estruturas geológicas que possam conter hidrocarbonetos.

No presente trabalho de graduação, avaliaremos as técnicas de deconvolução com o objetivo de obter o melhor resultado na aplicação do método *Surface-Related Multiple Elimination* (SRME) em linhas sísmicas 2D marítimas.

A deconvolução é uma etapa do processamento sísmico que busca aumentar a resolução do dado, de forma que as reflexões se tornam mais visíveis. Para entender este processo é preciso primeiro examinar os elementos constituintes de um traço presente no sismograma. A terra é composta com camadas de rocha com diferentes litologias e propriedades físicas. Essas camadas são definidas pela sua impedância sísmica, ou seja, pelo produto da densidade da camada com a velocidade de propagação das ondas na camada. O contraste das impedâncias entre camadas adjacentes causa as reflexões que são registradas ao longo do perfil de superfície.

O modelo de um sismograma é dado pela convolução entre a resposta do impulso da terra com o pulso sísmico. Esse sismograma possui muitos componentes como por exemplo, a assinatura da fonte e as reflexões de superfície. A resposta do impulso da terra, ou função refletividade, é o que seria registrado se o pulso fosse apenas um pulso unitário. A resposta do impulso compreende reflexões primárias e todas as possíveis múltiplas. Uma ideal deconvolução deveria comprimir os componentes do pulso, deixando apenas a refletividade da terra no traço sísmico.

A compressão do pulso pode ser feita utilizando-se um filtro inverso como um operador de deconvolução. Um filtro inverso quando convolvido com o pulso sísmico, converte-o em um pulso unitário. Quando aplicado a um sismograma, o filtro inverso deve fornecer a função refletividade.

O trabalho de (Lima e Porsani, 2013) aborda a filtragem de Wiener convencional ou deconvolução *spike*, onde o pulso deve ser de fase mínima e a refletividade deve ser aleatória,

assim é possível obter um filtro inverso causal e a função de autocorrelação pode ser obtida diretamente do traço sísmico. A resolução da saída da filtragem de Wiener pode ser controlada designando um filtro de erro de predição de Wiener. Converter o pulso sísmico em um pulso unitário é pedir por uma resolução perfeita. Na prática, devido ao ruído no sismograma e das suposições feitas sobre o pulso sísmico e o sismograma de registro, a deconvolução *spike* não é sempre desejável.

A deconvolução utilizando a norma L_p foi utilizada para desenvolver os trabalhos de (Lima e Porsani, 2013) e (Melo e Porsani, 2001). Ela é capaz de realizar a compressão do pulso utilizando filtros causais e não causais, ou seja, utilizando esse tipo de deconvolução é possível contornar a premissa de fase mínima do pulso. Dessa forma é possível aplicar a deconvolução com norma L_p também para pulsos de fase mista, e como consequência estes apresentam resultados melhores que a deconvolução *spike* convencional.

Uma outra premissa da deconvolução de Wiener convencional é que o pulso sísmico deve ser estacionário ao longo do traço sísmico, o que não acontece na realidade. Para resolver esse problema a deconvolução adaptativa é utilizada como exemplo no trabalho de (Montenegro e Porsani, 1995), e um diferente filtro de Wiener é aplicado para cada porção do traço sísmico, que podem ser considerados aproximadamente estacionários.

Após a obtenção de todos os dados deconvolvidos, utilizaremos estes como dados de entrada para um fluxo de processamento onde o método para atenuação de múltiplas utilizado será o SRME que prediz e subtrai a múltipla do dado original.

Para melhor entendimento dos processos desenvolvidos, o trabalho foi dividido em três capítulos de corpo. O capítulo um tem como objetivo fornecer a fundamentação teórica dos métodos de filtragem utilizados. O capítulo dois possui a finalidade de demonstrar os processos necessários para obtenção dos resultados. E o último capítulo descreve os melhores resultados obtidos nos testes em dados reais.

É importante ressaltar que o processamento do dado da Bacia de Jequitinhonha, foi realizado, até a fase final de empilhamento. Dessa forma foi possível visualizar o dado com a melhor resolução obtida. Parte do desenvolvimento deste trabalho é feito no *software* de processamento ProMax/*Seisspace* e parte é realizado utilizando a linguagem FORTRAN.90.

Capítulo 1

Fundamentação Teórica

A busca de soluções para problemas geofísicos utilizando filtros digitais é uma tarefa de grande importância para a ciência. O modelo básico apresentado neste capítulo possui como objetivo, minimizar a energia entre o resultado desejado e o resultado real obtido, e assim então, encontrar o filtro ótimo, ou filtro de mínimos quadrados. Veremos aqui, a partir dos princípios básicos, a teoria por trás desses filtros, que possuem como principal finalidade melhorar a resolução sísmica.

1.1 Método dos Mínimos Quadrados

Antes de lidar com o problema da solução do filtro, é importante discutir primeiro os procedimentos necessários para obtenção destes. Todos os conceitos básicos discutidos aqui servirão como base para a futura discussão da filtragem utilizando o método dos mínimos quadrados.

1.1.1 Conceitos básicos

Dizemos que um sinal digitalizado pode ser visto na forma de séries no tempo, que significa números em uma sequência com um espaçamento de uma unidade de tempo entre cada número da sequência. Uma *wavelet* é um sinal de valores insignificamente pequenos exceto em algumas regiões finitas da escala de tempo, portanto, existe uma porção da escala de tempo infinita onde ela ocorre. Um parâmetro importante de uma *wavelet*, com amplitudes,

$$b_0, b_1, b_2, \dots,$$

é a soma dos quadrados de suas amplitudes,

$$b_0^2 + b_1^2 + b_2^2 + \dots,$$

que é chamada de energia da *wavelet*, onde a energia é finita e é chamada de energia do sinal. Introduzimos então o valor esperado de símbolo E para denotar a operação de obtenção da média. Correlacionando o sinal com ele mesmo, que é, correlacionar o sinal com sua replica sem nenhuma mudança no tempo. Para a *wavelet* b_t essa quantidade é sua energia, dada por:

$$E\{b_t^2\} = \sum_{t=0}^{\infty} b_t^2 = b_0^2 + b_1^2 + b_2^2 + \dots \quad (1.1)$$

A notação $E\{\cdot\}$ denota a média da quantidade dentro das chaves; para a *wavelet* essa média é o somatório dos quadrados. Em outras palavras $E\{\cdot\}$ indica a média de energia. Se correlacionarmos um sinal não com ele mesmo, mas com uma replica dele mesmo deslocado por uma quantidade τ ao longo do eixo do tempo, esperamos que a quantidade da correlação seja algo menor. A dependência da correlação com o deslocamento é uma característica importante, e é chamada de função de autocorrelação de um sinal. A autocorrelação de uma *wavelet* b_t é:

$$\phi_{bb}(\tau) = \sum b_{t+\tau} b_t = E\{b_{t+\tau} b_t\}. \quad (1.2)$$

Para $\tau = 0$, a autocorrelação resulta na energia. A correlação cruzada entre o sinal x_t e o sinal y_t é:

$$\phi_{xy}(\tau) = E\{x_{t+\tau} y_t\}. \quad (1.3)$$

Aqui o sinal $x_{t+\tau}$ representa a replica do sinal x_t deslocado para a esquerda ao longo do eixo do tempo pela quantidade τ . Nesse caso nós assumimos nos cálculos o sinal algébrico de τ , então se τ é negativo, o deslocamento de x_t seria para a direita. A correlação cruzada entre y_t e x_t é:

$$\phi_{yx}(\tau) = E\{y_{t+\tau} x_t\}. \quad (1.4)$$

Aqui o sinal $y_{t+\tau}$ representa a replica do sinal y_t deslocado para a esquerda ao longo do eixo do tempo pela quantidade τ . Isso é equivalente a deslocar o sinal x_t para a direita pela quantidade τ , então,

$$\phi_{yx}(\tau) = \phi_{xy}(-\tau), \quad (1.5)$$

se $y = x$, a expressão acima se reduz a

$$\phi_{xx}(\tau) = \phi_{xx}(-\tau), \quad (1.6)$$

isso é, a autocorrelação é uma função par (Robinson e Treitel, 2000).

1.1.2 Filtro de mínimos quadrados

Consideramos aqui, o problema em achar um filtro na forma do domínio do tempo $f_t = (f_0, f_1, \dots, f_m)$ de comprimento $(m + 1)$ que transforma um pulso de entrada $b_t =$

(b_0, b_1, \dots, b_n) de comprimento $(n+1)$ em um pulso de saída desejado $d_t = (d_0, d_1, \dots, d_{m+n})$ de comprimento $(m+n+1)$ de forma que o erro da energia entre a saída desejada d_t e a saída real $c_t = (c_0, c_1, \dots, c_{m+n})$ de comprimento $(m+n+1)$ seja minimizado. A saída real é a convolução do filtro com o pulso de entrada,

$$c_t = b_t * f_t = \sum_{\tau=0}^m f_\tau b_{t-\tau}, \quad (1.7)$$

o erro da energia, J é dado por:

$$J = E\{(d_t - c_t)^2\} = E\left\{\left(d_t - \sum_{\tau=0}^m f_\tau b_{t-\tau}\right)^2\right\}. \quad (1.8)$$

O menor valor alcançado para uma dada situação fornecerá o melhor filtro linear no sentido dos mínimos quadrados. Para tornar esse problema possível de ser calculado em um computador, os filtros devem ter um número finito de coeficientes, ou seja:

$$f_t = (f_0, f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m).$$

O erro da energia é mínimo se suas derivadas parciais em relação a cada um dos coeficientes do filtro for igual a zero. Assim, a derivada parcial de J com relação a f_1 é,

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial f_1} &= E\left\{2\left(d_t - \sum_{\tau=0}^m f_\tau b_{t-\tau}\right) \frac{\partial}{\partial f_1} \left(d_t - \sum_{\tau=0}^m f_\tau b_{t-\tau}\right)\right\}; \\ &2E\left\{\left(d_t - \sum_{\tau=0}^m f_\tau b_{t-\tau}\right)(-b_{t-1})\right\}; \\ &2E\left\{-d_t b_{t-1} + \sum_{\tau=0}^m f_\tau b_{t-\tau} b_{t-1}\right\}; \\ &2\left[-E\{d_t b_{t-1}\} + \sum_{\tau=0}^m f_\tau E\{b_{t-\tau} b_{t-1}\}\right]; \\ &2\left[-\phi_{db}(1) + \sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{bb}(1-\tau)\right]. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Fazendo a derivada parcial igual a zero, obtemos a equação:

$$\sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{bb}(1-\tau) = \phi_{db}(1). \quad (1.10)$$

De maneira similar, é possível calcular as derivadas parciais de J com respeito a f_j ($j = 0, 1, 2, \dots, m$). Dessa maneira, é obtido um sistema de $(m+1)$ equações lineares simultâneas com os coeficientes desconhecidos do filtro, que podem ser escritas na forma:

$$\sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{bb}(j-\tau) = \phi_{db}(j) \quad \text{para } j = 0, 1, 2, \dots, m. \quad (1.11)$$

Essas são as equações normais e sua solução fornece os coeficientes f_j . As quantidades conhecidas no sistema de equações são a autocorrelação $\phi_{bb}(\tau)$ do sinal de entrada e a correlação cruzada $\phi_{db}(\tau)$ do sinal de saída desejado com o sinal de entrada.

Se tratarmos de d_t e c_t como vetores, e assim fizer $\mathbf{d}_t = \mathbf{c}_t + \mathbf{e}_t$, onde \mathbf{e}_t é o erro entre o sinal de saída desejado e o real, a magnitude do vetor \mathbf{e}_t será mínimo quando $\mathbf{e}_t \perp \mathbf{c}_t$; isto é, quando \mathbf{e}_t é normal a \mathbf{c}_t . É devido a essa propriedade que as equações são chamadas de equações normais.

O resultado da equação 1.11 equivale à versão discreta da equação de Wiener-Hopf, que é definida por:

$$\int_0^{\infty} C(j - \tau)f(\tau)d\tau = \phi_{db}(j). \quad (1.12)$$

A equação 1.11 é a principal equação do chamado filtro de Wiener-Hopf. Sua extensão para múltiplos valores de deslocamento j admite a seguinte forma matricial:

$$[\mathbf{C}][\mathbf{f}] = [\phi], \quad (1.13)$$

ou,

$$\begin{bmatrix} c_0 & c_1 & \dots & c_{m-1} & c_m \\ c_1 & c_0 & \dots & c_{m-2} & c_{m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{m-1} & c_{m-2} & \dots & c_0 & c_1 \\ c_m & c_{m-1} & \dots & c_1 & c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{m-1} \\ f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_{m-1} \\ \phi_m \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

onde $[\mathbf{C}]$ é formada pelos coeficientes da autocorrelação da série dada, b_t , e a matriz-coluna ϕ é construída com parte de deslocamentos não negativos da correlação cruzada entre d_t e b_t .

Nos dois casos, o subscrito identifica o número de amostras correspondente ao deslocamento. Para solucionar esta matriz 1.14, é necessário inverter a matriz autocorrelação, $[\mathbf{C}]$, a qual apresenta duas propriedades fundamentais: (1) é simétrica, em relação à diagonal principal e; (2) cada uma das diagonais é constituída por coeficientes idênticos. A última propriedade, identificada como Toeplitz, é fundamental para a inversão da matriz de autocorrelação com base na recursão de Levinson.

Utilizando uma expressão mais conveniente para o erro da energia J , temos:

$$J = E \left\{ \left(d_t - \sum_{\tau=0}^m f_{\tau} b_{t-\tau} \right)^2 \right\} \quad (1.15)$$

$$= E \{ d_t^2 \} - 2E \left\{ d_t \sum_{\tau=0}^m f_{\tau} b_{t-\tau} \right\} + E \left\{ \sum_{\tau=0}^m f_{\tau} b_{t-\tau} \sum_{\mu=0}^m f_{\mu} b_{t-\mu} \right\} \quad (1.16)$$

$$= E\{d_t^2\} - 2 \sum_{\tau=0}^m f_\tau E\{d_t b_{t-\tau}\} + \sum_{\tau=0}^m f_\tau \sum_{\mu=0}^m f_\mu E\{b_{t-\tau} b_{t-\mu}\}, \quad (1.17)$$

onde μ é um índice do somatório simulado. Porém nós temos:

$$E\{d_t^2\} = \phi_{dd}(0), \quad (1.18)$$

$$E\{d_t b_{t-\tau}\} = E\{d_{t-\tau} b_t\} = \phi_{zx}(\tau), \quad (1.19)$$

$$E\{b_{t-\tau} b_{t-\mu}\} = E\{b_{t+\mu-\tau} b_t\} = \phi_{xx}(\mu - \tau). \quad (1.20)$$

O lado esquerdo da equação 1.18 é a energia da saída desejada d_t , vemos que essa quantidade é igual ao atraso zero da autocorrelação de d_t . A equação 1.19 e 1.20 seguem da definição de correlação cruzada e autocorrelação. Se substituirmos as relações 1.18 a 1.20 na equação 1.17, teremos:

$$J = \phi_{dd}(0) - 2 \sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{db}(\tau) + \sum_{\tau=0}^m f_\tau \sum_{\mu=0}^m f_\mu \phi_{bb}(\mu - \tau). \quad (1.21)$$

Mantendo em mente que $\phi_{bb}(\mu - \tau) = \phi_{bb}(\tau - \mu)$, nós substituímos o somatório do último termo no lado direito da equação 1.21 pelo lado direito na equação 1.11. Isso fornece:

$$\begin{aligned} J_{min} &= \phi_{dd}(0) - 2 \sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{db}(\tau) + \sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{db}(\tau) = \\ &= \phi_{dd}(0) - \sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi_{db}(\tau). \end{aligned} \quad (1.22)$$

É conveniente normalizar a expressão 1.21 de maneira que o valor do erro mínimo de energia será sempre entre zero e um. Isso é feito dividindo os dois lados da equação 1.21 por $\phi_{dd}(0)$ (que nunca é zero exceto no caso trivial de uma saída desejada com zero para todo t) e obtemos,

$$\frac{J_{min}}{\phi_{dd}(0)} = 1 - \sum_{\tau=0}^m f_\tau \frac{\phi_{db}(\tau)}{\phi_{dd}(0)}$$

Fazendo $J_{min}/\phi_{dd}(0) = E$ e $\phi_{db}(\tau)/\phi_{dd}(0) = \phi'_{db}(\tau)$, podemos escrever:

$$E = 1 - \sum_{\tau=0}^m f_\tau \phi'_{db}(\tau). \quad (1.23)$$

Desde que o erro é a soma dos quadrados, ele nunca poderá ser negativo. E também, não poderá ser maior que um, porque o valor de um para E pode sempre ser obtido deixando o filtro f_τ identicamente igual a zero. Logo, temos:

$$0 \leq E \leq 1.$$

A quantidade E é chamada *erro médio quadrático normalizado*. Se ele é zero, a eficiência do filtro foi perfeita; isso é, houve uma completa concordância entre a saída desejada d_t e a saída real c_t . Por outro lado, se E é um, não existe nenhuma concordância entre a saída desejada e a saída real, e essa situação corresponde ao pior caso possível. Para valores fixos, o filtro de mínimos quadrados é aquele filtro para o qual E é o mínimo. No entanto, no modelo geral do filtro, podemos modificar esses parâmetros que estão sujeitos a restrições impostas pela situação física. Então, devemos, como regra, procurar achar esses valores dos parâmetros que fornecem um filtro de mínimos quadrados para qual E é o menor possível.

A eficiência do filtro para uma dada saída desejada d_t sempre melhora a medida em que o número de coeficientes no filtro dos mínimos quadrados $f_t(t = 0, 1, 2, \dots, m)$ aumenta. Para um filtro de comprimento fixo a eficiência pode ser melhorada se atrasarmos a saída desejada d_t com respeito a entrada b_t .

As equações normais 1.11 podem ser resolvidas por técnicas padrões. Porém, essa abordagem se torna difícil para muitos valores de m na prática. Para esses casos o sistema é resolvido pelo método de Toeplitz, que faz uso de um alto grau de simetria.

Sabemos que o valor de E decresce a medida que m cresce. De fato, devido a *wavelet* de entrada ser de fase-mínima, a medida que $m \rightarrow \infty$ o filtro *spike* se aproxima do filtro inverso exato. Uma das vantagens disso é que podemos obter uma eficiência do filtro satisfatória com o filtro dos mínimos quadrados com comprimento da ordem da duração da *wavelet* de entrada. O filtro de mínimos quadrados de comprimento finito é em geral não exato. Ele minimiza o erro da energia entre o real e o desejado. Mas a custo deste erro, que é quase sempre tolerável, pode-se obter funções de resposta com comprimentos tratáveis.

A eficiência do filtro pode ser melhorada adicionando um atraso inofensivo ao sinal de saída desejada. A exceção aparece no caso de uma *wavelet* de entrada de fase mínima, onde a adição de um atraso na saída desejada não é necessária, já que a melhor performance ocorre para o atraso zero (Robinson e Treitel, 2000).

1.1.3 *Wavelet spiking* e a distribuição de energia

Para *wavelets* causais, ou seja, aquelas definidas apenas para tempos não negativos, a fase pode ser classificada em três tipos diferentes (Figura 1.1). A *wavelet* (a) tem o máximo de amplitude concentrado nos intervalos de tempos iniciais ou anteriores, ou seja, a energia é atrasada no tempo de uma quantidade menor possível. Por essa razão essa *wavelet* é chamada de fase mínima ou atraso mínimo. A *wavelet* (c) tem o máximo de amplitude concentrado nos intervalos de tempo finais, ou futuros. Em outras palavras, ela é atrasada de uma quantidade maior possível. Por essa razão ela é chamada de fase máxima ou atraso máximo. O intermédio entre fase mínima e fase máxima é chamado de fase mista.

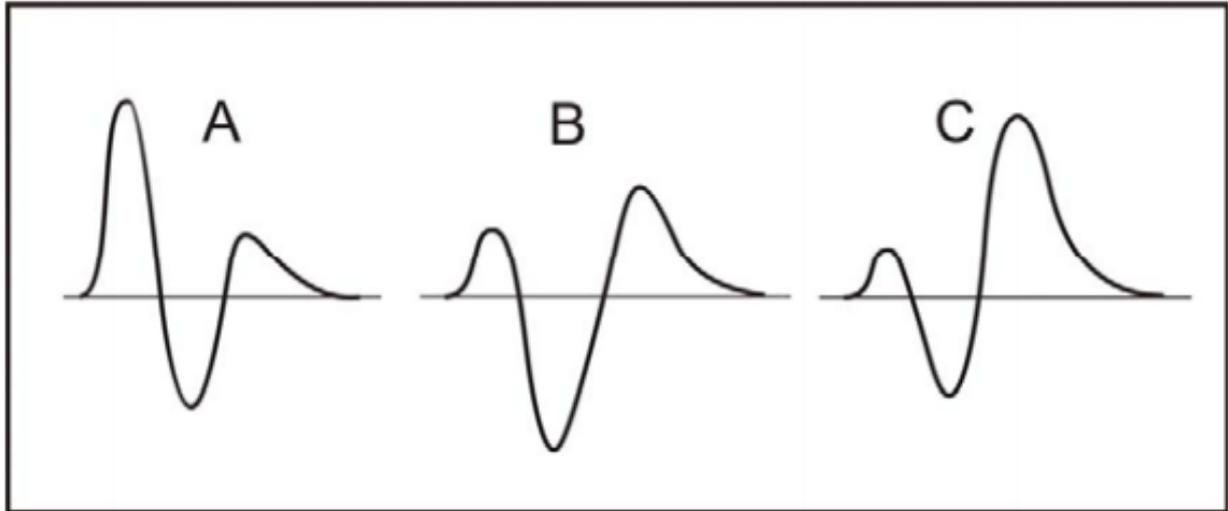


Figura 1.1: (A) *Wavelet* de fase mínima, (B) *wavelet* de fase mista e (C) de fase máxima.

Fonte: Adaptado do Yilmaz, 2001.

Considerando uma *wavelet* de fase mista, o problema é encontrar um filtro que transforme-a em um pulso unitário. Em teoria isto seria exato, se fosse possível utilizar um filtro cujo comprimento pudesse ser infinitamente longo. Para um desempenho do filtro exato, é preciso atrasar o pulso unitário desejado em uma quantidade infinita de tempo relativa ao pulso original. A exceção ocorre na *wavelet* de fase mínima. Então o pulso unitário desejado não precisa ser atrasado para obter um desempenho do filtro exato. Embora o comprimento do filtro precisa ainda ter comprimento infinito.

Na prática, o comprimento dos filtros é finito. E assim, a proposta é atingida de maneira aproximada. É sempre possível melhorar o desempenho, aumentando o comprimento do filtro, mas considerações físicas nos impede de fazer esse comprimento infinitamente longo. Por outro lado é possível encontrar o atraso no sinal de saída desejado que leva ao menor valor de E para um dado comprimento do filtro. Logo o erro mínimo do filtro é função do atraso e do comprimento.

Para uma *wavelet* de fase mínima é razoável esperar que o sinal de saída desejado no valor de atraso zero concede melhores resultados do que um pulso unitário atrasado no tempo. Em outras palavras, se a energia da *wavelet* de fase mínima está concentrada nos intervalos de tempos iniciais, faz sentido atrasar o pulso unitário desejado em relação a esta parte inicial. Similarmente para uma *wavelet* de fase máxima, o melhor desempenho ocorre para os maiores valores de atraso possível. Essas regras funcionam apenas para filtros *spike* que são suficientemente longos em relação ao comprimento da *wavelet* de entrada. Isso é, para filtros *spike* suficientemente longos, a melhor posição para o pulso unitário ocorre em zero para fase mínima e em $(n + m)\Delta t$ para fase máxima da *wavelet* de entrada.

Para filtros *spike* que são mais curtos em relação ao comprimento da *wavelet* de entrada, haverá desvios dessas regras para a melhor posição do pulso unitário. O caso da *wavelet* de fase mista representa uma situação intermediária. Concluímos que o erro é reduzido se a saída desejada se assemelhar bastante à distribuição de energia no sinal de entrada. Observe que uma *wavelet* é definida como uma forma de onda transiente com uma duração finita. Uma *wavelet* de fase mínima sendo zero antes de $t = 0$ é chamada de causal. Essas definições são consistentes com a intuição, os sistemas físicos respondem a uma excitação somente após essa excitação. Sua resposta também é de duração finita. Em resumo, uma onda de fase mínima tem duração finita e é causal. A base para o teorema do atraso de energia de Robinson é: uma onda de fase mínima tem o menor atraso de energia (Robinson e Treitel, 2000).

1.2 Deconvolução *Spike*

A deconvolução nos permite melhorar a resolução temporal do dado sísmico. De maneira ideal, a deconvolução seria capaz de recuperar exatamente a função refletividade. O traço sísmico é resultado da interação do pulso sísmico com o meio geológico, desde o instante em que o pulso é gerado até o momento em que as reflexões são registradas. De forma analítica os traços são resultantes da convolução do pulso sísmico gerado na fonte sísmica com uma série de coeficientes de reflexão, a função refletividade, mais um operador linear que representa o ruído indesejável (Figura 1.2).

O modelo convolucional é descrito matematicamente por:

$$x_t = p_t * e_t + n_t, \quad (1.24)$$

onde:

x_t = traço sísmico;

p_t = pulso sísmico;

e_t = função refletividade;

n_t = ruído;

* = representação da convolução.

Algumas hipóteses utilizadas para a construção do traço sísmico, são:

- A terra é constituída de camadas plano-horizontais com velocidade constante;
- A fonte gera uma onda plana compressional que atinge as camadas em incidência normal. Sob tais circunstâncias as ondas cisalhantes não ocorrem;

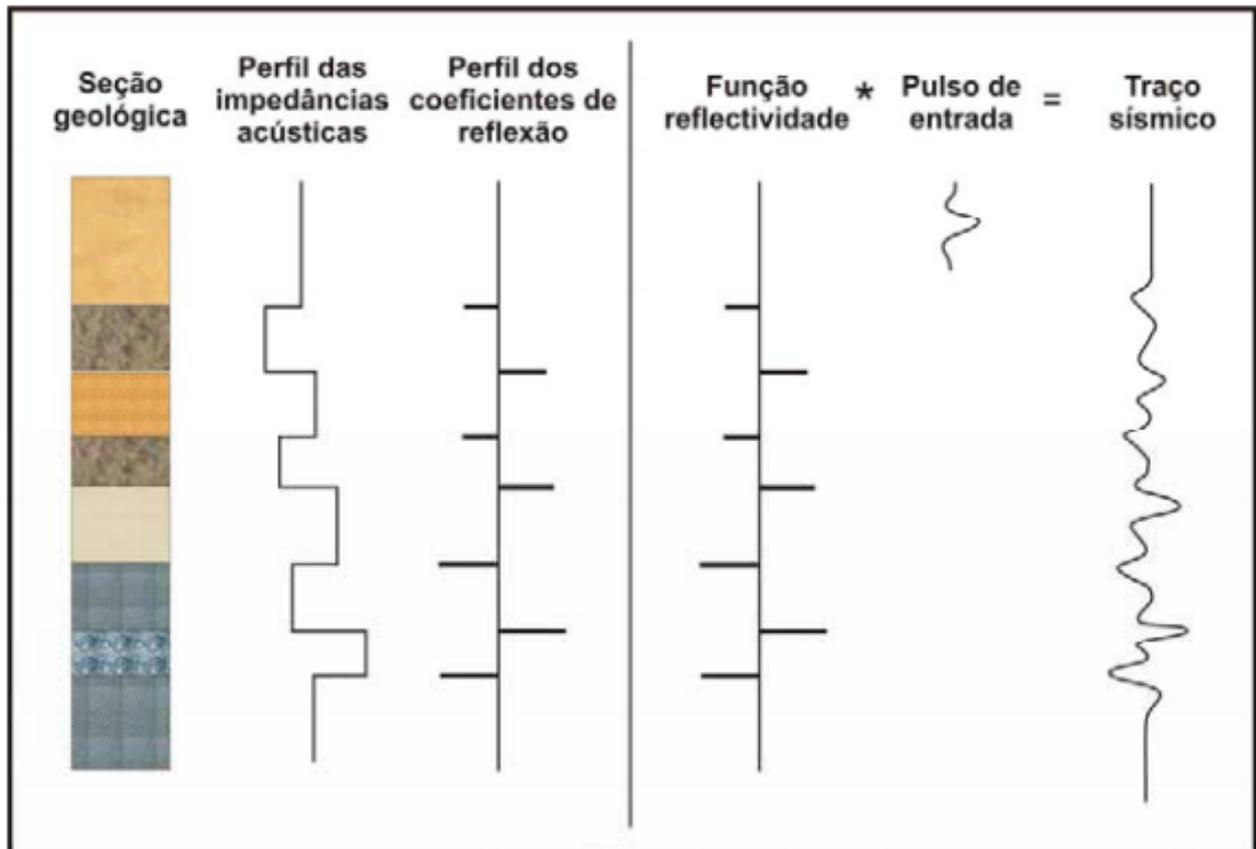


Figura 1.2: Modelo de convolução do traço sísmico pela convolução do pulso com a função refletividade. Adaptado de Kearey e Brooks (1991).

- A forma da onda não muda em subsuperfície, é estacionária, não se considera o decaimento de amplitude (devido a divergência da frente de onda) e a atenuação das altas frequências (efeitos de absorção nas rochas);
- A componente de ruído n_t é desprezível;
- A forma da onda da fonte é conhecida.

A equação 1.24 pode ser escrita na forma de um somatório,

$$x_t = \sum_{k=0}^{N_p} e_{t-k} p_k + n_t. \quad (1.25)$$

A deconvolução de um pulso sísmico é a convolução do pulso com o seu filtro inverso. Se \tilde{h}_t é uma aproximação do inverso do pulso p_t , então:

$$\tilde{h}_t * p_t \approx \delta_t = \begin{cases} 0 & \text{se } t \neq 0 \\ 1 & \text{se } t = 0 \end{cases}$$

Se n_t é desprezível e \tilde{h}_t representa o filtro inverso do pulso, $\tilde{h}_t = p_t^{-1}$, a deconvolução irá restituir a função refletividade, ou seja, irá produzir a resposta impulsiva da terra,

$$\tilde{h}_t * x_t = \tilde{h}_t * p_t * e_t = \delta_t * e_t = e_t. \quad (1.26)$$

O cálculo da solução de sistemas lineares lineares de equação, realizado na seção anterior pelo método dos mínimos quadrados, descreve o método de deconvolução em termos de filtros lineares. Quando a forma da onda da fonte (assinatura da fonte) é conhecida, o problema é de solução determinística. Essa solução é dada pelo filtro inverso. Quando está forma é desconhecida, o problema é calculado de forma estatística. Existe então, um filtro \tilde{g}_t que convolvido com o traço sísmico x_t dará a função requerida. Esse filtro é chamado de operador de erro de predição de Wiener.

1.2.1 Filtro inverso de um pulso conhecido

Se a assinatura da fonte é conhecida, o filtro inverso, $\tilde{h}_t = \{\tilde{h}_0, \dots, \tilde{h}_N\}$, pode ser obtido quando convolvido com $p_t = p_0, \dots, p_M$, pois resultará na aproximação do impulso,

$$\tilde{h}_t * p_t = \tilde{\delta}_t \approx \delta_t. \quad (1.27)$$

Calcula-se e_t , isto é, o desvio entre o sinal desejado, δ_t , e o calculado, $\tilde{\delta}_t$,

$$\begin{aligned} e_t &= \delta_t - \tilde{\delta}_t = \\ &= \delta_t - \tilde{h}_t * p_t \end{aligned} \quad (1.28)$$

Usando um filtro de três coeficientes podemos reescrever a equação 1.28 em forma de matriz,

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & p_0 & 0 & 0 \\ 0 & p_1 & p_0 & 0 \\ 0 & p_2 & p_1 & p_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & p_M & p_{M-1} & p_{M-2} \\ 0 & 0 & p_M & p_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & p_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\tilde{h}_1 \\ -\tilde{h}_2 \\ -\tilde{h}_3 \end{bmatrix}. \quad (1.29)$$

A forma quadrática $\sum_t e_t^2$, é um número positivo que possui pelo menos um ponto de mínimo. O método dos mínimos quadrados nos permite obter o filtro inverso ótimo através da minimização de $Q(\tilde{h}^*)$. O resultado é um sistema de equações normais, representado por:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_N \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_1 \\ r_N & \dots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{h}_0 \\ \tilde{h}_1 \\ \vdots \\ \tilde{h}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1.30)$$

onde r_N é o coeficiente k da autocorrelação do pulso,

$$r_k = \sum_t p_t p_{t+k}. \quad (1.31)$$

A matriz de autocorrelação, banda-estruturada Toeplitz da 1.30 é simétrica em relação a diagonal principal. A solução desse sistema pode ser obtida pela recursão de Levinson.

1.2.2 Filtro de Wiener

No processo de deconvolução são levados em consideração algumas premissas: o pulso é de fase mínima, a refletividade é branca (Yilmaz, 1987), isto é, aleatória, e o pulso deve ser estacionário ao longo do traço sísmico. O pulso é de fase mínima, quando seu polinômio $P(Z)$ tem suas raízes no plano complexo Z , situadas fora do círculo de raio unitário.

A deconvolução de Wiener-Levinson tem três etapas:

1. Estima-se os coeficientes da função autocorrelação (FAC);
2. Obtêm-se o filtro inverso de Wiener-Levinson (WL);
3. Aplica-se o filtro aos traços sísmicos, através da deconvolução.

O filtro de Wiener é causal $t = (0, \dots, N)$. Reafirmamos então que o filtro de WL é o inverso de um pulso de fase mínima, pois somente pulsos de fase mínima possuem filtros inversos causais. A função de autocorrelação (FAC) utilizada, é um desafio para a deconvolução, uma vez que, por não conhecer o pulso sísmico da fonte, a FAC é estimada diretamente do traço sísmico sendo apenas uma aproximação da FAC do pulso sísmico, quando a função refletividade é dita ser aleatória, ou branca (Robinson e Treitel (1980), Yilmaz e Doherty (2001), Ledesma (2011)).

O traço sísmico x_t pode ser representado pelo modelo autoregressivo (AR):

$$\tilde{x}_t = \tilde{a}_1 x_{t-1} + \dots + \tilde{a}_N x_{t-N}. \quad (1.32)$$

O erro de predição $e_t = x_t - \tilde{x}_t$ pode ser representado por:

$$e_t = x_t - \tilde{a}_1 x_{t-1} - \tilde{a}_2 x_{t-2} - \dots - \tilde{a}_N x_{t-N}, \quad (1.33)$$

ou ainda:

$$e_t = \begin{bmatrix} x_t & x_{t-1} & \dots & x_{t-N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix},$$

onde $a_N = -\tilde{a}_N$.

Podemos representar o sistema linear de equações utilizando matrizes como exemplificado abaixo para um filtro de $N = 3$ coeficientes:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & 0 \\ x_3 & x_2 & x_1 & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & x_{M-1} & x_{M-2} & x_{M-3} \\ 0 & x_M & x_{M-1} & x_{M-2} \\ 0 & 0 & x_M & x_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}. \quad (1.34)$$

O vetor $(1 \ a_2 \ a_3)$ representa o operador preditivo de erro e os coeficientes a_N , $N = 1, 2, 3$ são obtidos com o método dos mínimos quadrados, resolvendo-se o sistema de equações normais abaixo:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1.35)$$

E_{a3} é a soma total dos erros quadrados minimizados e r_N representa os coeficientes da função de autocorrelação do traço sísmico x_t , dado por:

$$r_N = \sum_t x_t x_{t+N}. \quad (1.36)$$

A matriz de equações normais é a matriz de autocorrelação banda-estruturada Toeplitz. Este é um caso particular do método dos mínimos quadrados e pode ser resolvido pela recursão de Levinson.

O filtro causal $(1 \ a_{j1} \ \dots \ a_{jj})$ prediz x_t a partir de amostras de tempos passados x_{t-1}, \dots, x_{t-j} . O filtro $(a_{jj} \ \dots \ a_{j1} \ 1)$ é o filtro anti-causal que prediz amostras de x_t a partir de amostras a tempos futuros.

A deconvolução com um filtro causal e anti-causal utilizando um filtro de N coeficientes é representada por:

$$\begin{pmatrix} e_t^+ & e_t^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t & x_{t-1} & \dots & x_{t-N} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a_N \\ a_1 & \vdots \\ \vdots & a_1 \\ a_N & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.37)$$

Os filtros causal e não causal de WL serão utilizados na descrição do método de deconvolução com norma L_p .

1.3 Deconvolução com norma L_p

O método dos mínimos quadrados envolve os valores observados e o modelo desejado presentes na deconvolução que são encontrados no traço sísmico e na refletividade, respectivamente. Este método convencionalmente realiza o ajuste dos parâmetros minimizando a norma L_2 , isto é, a soma dos quadrados dos desvios. Grandes desvios podem ser minimizados com a norma L_1 , ou seja, a soma dos valores absolutos dos desvios. O problema da inversão linearizada pode ser solucionado estabelecendo-se uma aproximação linear para a equação que descreve determinado modelo. A definição de norma de um vetor, estende o formalismo da inversão linearizada à norma L_p .

A grande particularidade da deconvolução com norma L_p , é que esta opera tanto com o filtro causal quanto anti-causal. Está característica viabiliza a deconvolução de fase mista.

Na deconvolução com norma L_p é possível obter um resultado de qualidade mesmo utilizando um polinômio associado ao pulso sísmico que não seja de fase mínima como formalizado.

De acordo com Porsani et al. (2001), Melo e Porsani (2001) e Popini et al. (2001) a função objetivo em termos de norma L_p é escrita da forma a seguir:

$$Q(\mathbf{a}^+, p) = \sum_{t=0}^{M+N} \{[(e_t)^2]^{1/2}\}^p, \quad (1.38)$$

onde: \mathbf{a}^+ é o vetor com os elementos do filtro causal, p corresponde a norma, M o número de amostras, N o numero de coeficientes do filtro e e_t representa o erro de predição do sinal x_t , a partir da combinação linear de seus valores a tempos passados.

A função não linear dos erros pode ser definida como:

$$f(\mathbf{a}, p, t) = (e_t^2)^{p/4}. \quad (1.39)$$

Utilizando a série de Taylor em torno do modelo corrente \mathbf{a}_k , e tomando a aproximação de primeira ordem, temos:

$$f(\mathbf{a}, p, t) \cong \tilde{f}(\mathbf{a}, p, t) = f(\mathbf{a}_k, p, t) + \frac{p}{2} (e_t^2)^{p/4-1} (e_t) \left. \frac{\partial e_t}{\partial \mathbf{a}} \right|_{\mathbf{a}_k} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_k). \quad (1.40)$$

A aproximação por série de Taylor faz com que a função $f(\mathbf{a}, p, t)$ que antes era de natureza não linear, se torne agora uma função linear. Utilizando notação vetorial e matricial,

pode-se escrever a equação anterior de forma explícita,

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}(a, p, 0) \\ \vdots \\ \tilde{f}(a, p, M + N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0 \\ \vdots \\ f_{M+N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{00} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & F_{M+N, M+N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ x_0 & 0 & \cdots & 0 \\ & x_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_M & \vdots & \ddots & x_0 \\ 0 & x_M & \ddots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 - {}^k a_1 \\ \vdots \\ a_N - {}^k a_N \end{bmatrix}, \quad (1.41)$$

onde os elementos da matriz diagonal são dados por:

$$F_{ii} = \frac{p}{2}(e_i^2)^{p/4-1}(e_i), \quad (1.42)$$

$$f_i = (e_i^2)^{p/4}, \quad (1.43)$$

e e_i^2 representa a amostra na posição $t = i\Delta t$ do traço deconvolvido com o filtro $(1 a_k^T)$. A equação anterior pode ser representada de forma mais compacta,

$$\tilde{\mathbf{f}}_p = \mathbf{f}_{kp} - \mathbf{F}_{kp} \mathbf{X} \Delta \mathbf{a}, \quad (1.44)$$

o vetor $\Delta \mathbf{a}$ pode ser calculado de forma a minimizar a forma quadrática,

$$\tilde{Q}(\mathbf{a}, p) = \tilde{\mathbf{f}}_p^T \tilde{\mathbf{f}}_p, \quad (1.45)$$

derivando com relação aos parâmetros a_j , $j = 1 \dots, N$, obtém-se as equações normais:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X}) \Delta \mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp} \mathbf{f}_{kp}, \quad (1.46)$$

multiplicando-se os dois lados da equação 1.46 por $(\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X})^{-1}$, resolve-se para o vetor $\Delta \mathbf{a}$, e obtém-se:

$$\Delta \mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp} \mathbf{f}_{kp}, \quad (1.47)$$

os coeficientes do filtro podem ser atualizados por:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \Delta \mathbf{a}.$$

Para obtermos o vetor $\Delta \mathbf{a}$ através da equação 1.47 o método do conjugado gradiente é utilizado. Quando $p = 2$, observamos que o sistema de equações normais resultante está associado a norma L_2 correspondente ao filtro de Wiener-Levinson.

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \Delta \mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{e}_k, \quad (1.48)$$

\mathbf{e}_k representa o traço deconvolvido com o filtro \mathbf{a}_k , e $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ representa a matriz autocorrelação Toeplitz simétrica.

Estas equações envolvem a deconvolução do traço sísmico com o filtro causal $(1 \ \mathbf{a}_k^T)$. Pode-se obter analogamente equações para o filtro anti-causal, $(\mathbf{a}_k^T \ 1)$. O método de deconvolução com norma L_p utiliza o filtro causal e o anti-causal.

$$\begin{pmatrix} e_t^+ & e_t^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_t & x_{t-1} & \dots & x_{t-N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a_N \\ a_1 & \vdots \\ \vdots & a_1 \\ a_N & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.49)$$

1.3.1 Etapas do algoritmo DL_p

- Leitura do traço $\rightarrow x_t$;
- Calcula autocorrelação do traço $\rightarrow r_{xx}$;
- Calcula filtro inverso WL e deconvolve o traço $\rightarrow e_t^+ = x_t * \mathbf{a}_t$;
- Monta a matrix \mathbf{X} .

DO $k = 1, Niter$

- Calcula os elementos f_i do vetor \mathbf{f}_{kp} ;
- Calcula os elementos F_{ii} da matriz diagonal \mathbf{F}_{kp} ;
- Resolve o sistema com o método do conjugado gradiente $\Delta \mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp} \mathbf{f}_{kp}$;
- Atualiza o filtro $\rightarrow \mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \Delta \mathbf{a}$;
- Deconvolve o traço $\rightarrow e_t^+ = x_t * \mathbf{a}_{k+1}$.

ENDDO

- Atualiza o traço $\rightarrow x_t^+ = e_t^+$;
- Calcula a autocorrelação do traço x_t^+ ;

- Calcula e reverte o filtro WL $\rightarrow \mathbf{a}^-$;
- Deconvolve o traço $\rightarrow e_t^- = x_t^+ * \mathbf{a}_t^-$;
- Monta a matriz \mathbf{X}_- .

DO $k = 1, Niter$

- Calcula os elementos f_i do vetor \mathbf{f}_{pk} ;
- Calcula os elementos F_{ii} da matriz diagonal \mathbf{F}_{kp} ;
- Resolve o sistema com o método do conjugado gradiente $\Delta \mathbf{a}^- = (\mathbf{X}_-^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X}_-)^{-1} \mathbf{X}_-^T \mathbf{F}_{kp} \mathbf{f}_{kp}$;
- Atualiza o filtro $\rightarrow \mathbf{a}_{k+1}^- = \mathbf{a}_k^- + \Delta \mathbf{a}^-$;
- Deconvolve o traço $\rightarrow e_t^- = x_t^+ * \mathbf{a}_{k+1}^-$.

ENDDO

- Traço deconvolvido $x_t = e_t^-$.

1.4 Deconvolução Adaptativa

O método de deconvolução nem sempre é satisfatório, e um dos motivos que ocasionam problemas é que a realidade não possui um caráter estacionário. Isso acontece, pois existe uma perda de resolução vertical causada por propriedades inelásticas da terra que torna o método limitado. Foi sugerido por Wang (1977) que em condições de não estacionariedade do pulso sísmico, o traço registrado poderia ser dividido em janelas onde cada janela seria aproximadamente estacionária. Em seguida seria aplicado um filtro de Wiener determinado especificamente para a janela em questão. O traço total filtrado seria resultado da combinação entre as filtragens individuais em cada janela (Montenegro e Porsani, 1995).

Nos outros métodos de deconvolução citados acima, a deconvolução do traço é realizada utilizando-se todo o traço sísmico para calcular as funções de autocorrelação e obter uma estimativa do filtro inverso. Quando utilizamos uma janela deslizante, com comprimento fixo, esse processo passa a ser chamado de adaptativo (Alves, 2013). Dessa maneira, não mais utilizamos todo o traço sísmico para estimar os componentes do filtro. A janela se move, calculando o filtro para cada porção do traço. Neste caso, para cada posição da janela, a recursão de Levinson é aplicada diretamente ao traço sísmico nos dados do interior da janela. A janela é deslocada ganhando uma nova amostra à frente e perdendo uma amostra na parte de trás, de forma a continuar com número fixo de amostras. Uma nova recursão é aplicada ao

traço no interior da janela. Desta forma cada amostra do traço sísmico é deconvolvida várias vezes, enquanto a janela móvel se desloca. O traço filtrado é obtido calculando-se o valor médio do número de vezes que cada amostra foi deconvolvida. Devido a mudança no pulso ao se propagar em subsuperfície, o filtro deve se adaptar para que o resultado seja o mais próximo da realidade, esse é o motivo pelo qual a deconvolução é chamada de adaptativa.

Quando o processo é não estacionário e o pulso sísmico varia durante sua propagação, a qualidade e o conteúdo de frequência de um sismograma de reflexão também variam com o tempo. Os coeficientes do filtro são construídos usando um algoritmo adaptativo, que atualiza o filtro a cada ponto de dado traço, de forma a minimizar a energia do erro associado ao resultado da deconvolução (Clarke, 1968) (Griffiths et al., 1977).

1.4.1 Ajanelamento com zeros fora da janela

Se utilizarmos janelas em tempo, é possível supor que o pulso sísmico não varia no interior da janela, ou que a variação do pulso ocorre em menor grau. Dessa maneira é possível contornar o problema da não estacionariedade, já que na estimativa da autocorrelação utilizada há a contribuição apenas dos dados dentro da janela.

A vantagem do ajanelamento com zeros fora da janela, isto é, a vantagem do problema de predição linear no interior de uma janela, na qual os dados são considerados zerados fora da janela, é que, a solução mínimos quadrados resulta em resolver um sistema de equações normais Toeplitz e simétrico já conhecido nas outras deconvoluções.

Os valores nulos fora da janela não correspondem a realidade do traço sísmico, e embora seja possível calcular os coeficientes do filtro, a eficiência do filtro é afetada significativamente.

1.4.2 Deconvolução adaptativa monocanal

A deconvolução adaptativa apresentada no trabalho tinha como objetivo apenas deconvolver o pulso, dessa maneira assume-se que distância de predição L é igual a 1, pois o método não foi utilizado diretamente para atenuar múltiplas. Para o caso monocanal adaptativo, onde a posição inicial da janela móvel i aparece de forma explícita, o erro de predição para os operadores de ordem j e a posição inicial da janela móvel com M amostras dentro

do traço, pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_{j,1+i} \\ \vdots \\ \tilde{e}_{j,i+j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \tilde{e}_{j,i+M+j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1+i} & x_i & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ x_{i+j} & x_{i+j-1} & \cdots & x_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & x_{i+M-1} & \cdots & x_{i+M-j} \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_{i+M-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ c_{j,1}^i \\ \vdots \\ c_{j,j}^i \end{bmatrix}, \quad (1.50)$$

onde a posição inicial da janela deslizante M varia no intervalo $i = 0, 1, 2, \dots, N - M$, onde N representa a quantidade de amostras do traço.

A equação 1.50 pode ser reescrita em termos de notação vetorial e matricial:

$$\tilde{\mathbf{e}}_{j+1}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{1+i,j} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{X}_{j+i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{c}_j^i \end{bmatrix}. \quad (1.51)$$

A equação 1.51 fornece uma relação entre o conjunto de escalares que foram deconvolvidos e a posição da janela. Dessa forma temos que muitas amostras ao longo do traço serão deconvolvidas mais de uma vez. Um contador (ou vetor de trabalho) é responsável por armazenar a quantidade de vezes que uma amostra foi deconvolvida, dessa forma, é possível calcular o valor médio de cada amostra deconvolvida (Figura 1.3).

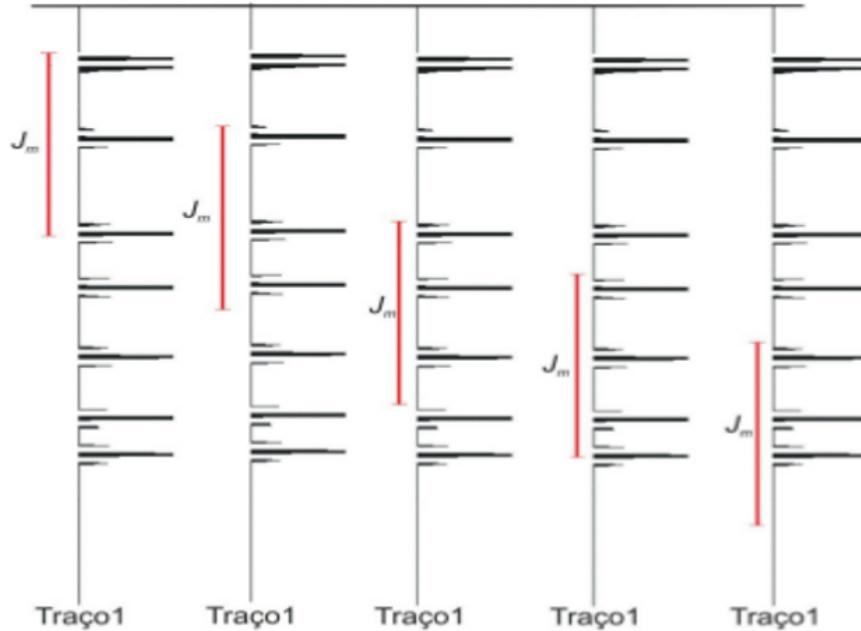


Figura 1.3: Filtragem adaptativa monocanal usando uma janela móvel deslizante de comprimento $M = 3$ em amostras. Adaptado de Oliveira et al. (2014).

1.4.3 Deconvolução adaptativa multicanal

Como a aquisição dos dados é realizada com muitos canais de registro, é possível ampliar a base estatística utilizada, abordando a deconvolução como um problema multicanal que leva em conta a correlação espacial entre eventos presentes em canais vizinhos. A exemplo do que ocorre na deconvolução WL convencional, o caso multicanal da deconvolução TWL pode ser descrita como uma generalização da teoria monocanal, através da introdução de matrizes em lugar de escalares (Santos Jr, 2002).

Podemos representar a deconvolução adaptativa multicanal através da equação:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{j+1,i}^K = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{1+i,j}^K & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{X}_{j,i}^K & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{X}_{j,i}^K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{I}} \\ \tilde{\mathbf{A}}_{j+1,1}^i \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{A}}_{j+1,j+1}^i \end{bmatrix}, \quad (1.52)$$

onde: $\tilde{\mathbf{E}}_{j+1,i}^K$ representa a matriz $(M + N - 1 \times K)$ dos traços deconvolvidos;

$\mathbf{X}_{j,i}^K$ é a matriz $(M \times K)$, onde cada coluna representa um traço sísmico, definida por:

$$\mathbf{X}_{j,i}^K = \begin{bmatrix} x_{1,i} & \cdots & x_{K,i} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{1,M+i-1} & \cdots & x_{K,M+i-1} \end{bmatrix}, \quad (1.53)$$

$\mathbf{X}_{1+i,j}^K$ é a matriz $(M \times K)$, onde cada coluna representa o traço avançado de 1 amostra,

$$\mathbf{X}_{1+i,j}^K = \begin{bmatrix} x_{1,1+i} & \cdots & x_{K,1+i} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{1,i+M} & \cdots & x_{K,i+M} \end{bmatrix}, \quad (1.54)$$

onde: i é a posição inicial da janela deslizante; j é o índice associado ao número de coeficientes do filtro; M é o tamanho da janela em número de amostras; K é o número de canais; k é o índice associado ao canal (traço sísmico); $\tilde{\mathbf{I}}$ é a matriz identidade de ordem $(K \times K)$; $\tilde{\mathbf{A}}_{j+1,j+1}^i$ é a matriz $(K \times K)$, associada ao operador multicanal de erro de predição.

1.5 Atenuação de Múltiplas

1.5.1 Múltiplas

Uma reflexão é dita múltipla quando uma onda que se propaga da subsuperfície para a superfície retornar à subsuperfície sempre que encontrar obstáculos maiores que seu comprimento de onda (espalhamento descendente) (Figura 1.4). Muitas vezes essas reflexões são

consideradas como ruídos, já que podem prejudicar a visualização de informações importantes da sísmica. Portanto, é necessário uma atenuação de múltiplas para uma interpretação das reais informações.

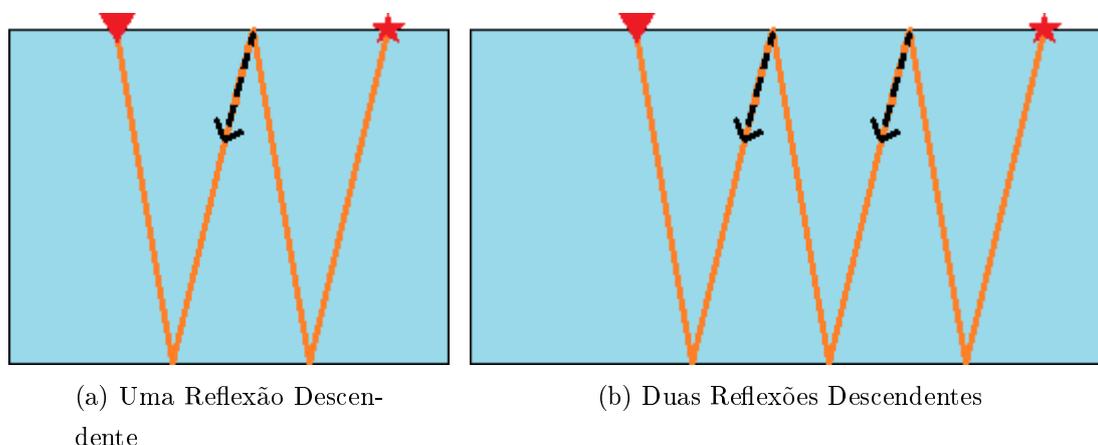


Figura 1.4: Nas reflexões primárias as ondas sofrem apenas uma reflexão ascendente. (a) Múltipla com apenas uma reflexão descendente e (b) outro tipo de múltipla com duas reflexões descendentes.

As múltiplas podem ser divididas em vários tipos de acordo com a origem, simetria, percurso e quanto a ordem. As múltiplas de superfície livre que serão tratadas neste trabalho, estão relacionadas ao primeiro receptor. Nos dados marinhos, elas se originam na interface água/ar (Figura 1.5).

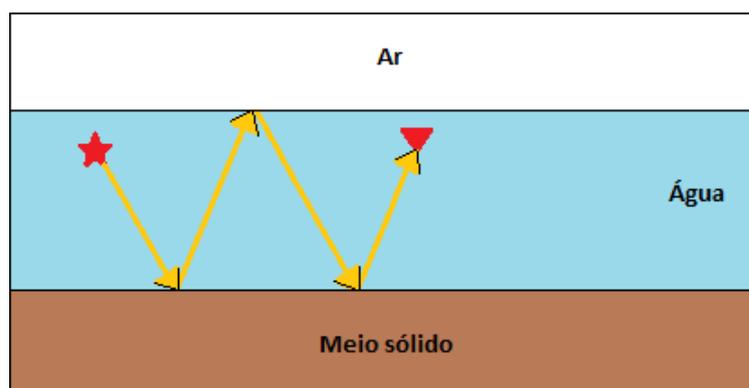


Figura 1.5: A trajetória da onda associada a múltipla de superfície livre.

1.5.2 Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície - (*Surface Related Multiple Elimination*) - SRME

O SRME é um método de filtragem que está relacionado principalmente com a atenuação da múltipla de superfície livre. A grande vantagem da utilização desse método de

filtragem é a necessidade apenas do conhecimento acerca da superfície, como refletividade da superfície e características de fonte e receptor.

De acordo Verschuur (2006) a múltipla de primeira ordem pode ser considerada como constituída por dois caminhos primários, que estão ligados no ponto de superfície de reflexão (Figura 1.6). Segundo a lei de Snell no ponto de reflexão, podemos afirmar que o ângulo de incidência de chegada da primeira primária ao receptor deve ser o mesmo ângulo de emissão da segunda primária. Assim, podemos combinar reflexões primárias para construir múltiplas de primeira ordem.

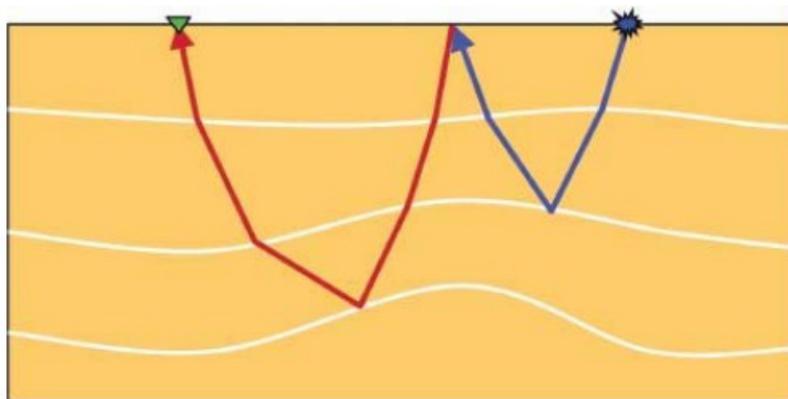


Figura 1.6: A múltipla de primeira ordem pode ser representada pela combinação de duas primárias, conectadas entre si por um ponto de reflexão na superfície (Verschuur, 2006).

Anstey (1966) implementaram este método a partir da modelagem de múltiplas pela autoconvolução do traço sísmico, utilizando primordialmente a ideia de autocorrelação de traços. Anstey, em 1966, afirma que a função de autocorrelação possui informações acerca das múltiplas em um traço.

Considerando uma resposta sísmica de um impulso da terra, sem o efeito da superfície, é definida por $x_o(t)$ e contém todas as reflexões primárias e múltiplas internas (Verschuur, 2006). Se todos estes eventos atingirem a superfície livre, todos eles irão refletir de volta para o meio. Assim sendo, cada evento da resposta primária irá atuar como uma nova fonte. Dessa maneira obtêm-se uma sequência de múltiplas de primeira ordem, convolvendo com a própria resposta impulsiva (Verschuur, 2006):

$$m_1(t) = -x_o(t) * x_o(t), \quad (1.55)$$

o sinal negativo indica uma inversão de polaridade devido a reflexão na superfície. Se cada múltipla de primeira ordem atuar como uma nova fonte ao chegar novamente na superfície, as múltiplas de segunda ordem serão escritas como:

$$m_2(t) = -x_o(t) * m_1(t) = x_o(t) * x_o(t) * x_o(t), \quad (1.56)$$

logo, para ordem n temos:

$$m_n(t) = x_o(t) * x_o(t) * x_o(t) * \dots * x_o, \quad (1.57)$$

A resposta total $x(t)$, possuindo todas as múltiplas de superfície é escrita como:

$$x(t) = x_o(t) - x_o(t) * x_o(t) + x_o * x_o(t) * x_o(t) - \dots \quad (1.58)$$

A resposta impulsiva $x(t)$ é detectada na superfície, mas também é refletida de volta para a subsuperfície gerando uma ordem maior de múltiplas (Verschuur, 2006). Dizemos então que o campo descendente total é igual a fonte original, $\delta(t)$, combinado com a resposta total refletida $-x(t)$, e este campo de onda irá refletir na subsuperfície por meio da resposta da terra $x_o(t)$. Isso pode ser escrito como:

$$x(t) = x_o(t) * [\delta - x(t)] = x_o(t) - x_o(t) * x(t). \quad (1.59)$$

Logo, todas as múltiplas podem ser geradas pela convolução da resposta primária com a resposta total. No domínio da frequência temos:

$$X(f) = X_o(f) - X_o^2(f) + X_o^3(f) - X_o^4(f) + \dots, \quad (1.60)$$

$$X(f) = X_o(f) - X_o(f)X(f), \quad (1.61)$$

Isolando $X(f)$ e $X_o(f)$ na equação 1.61, temos:

$$X(f) = X_o(f)[1 + X_o(f)]^{-1}, \quad (1.62)$$

$$X_o(f) = X(f)[1 - X(f)]^{-1}. \quad (1.63)$$

Obtemos então a equação 1.63 onde temos a resposta impulsiva sem a presença de múltiplas de superfície a partir da resposta total. Expandindo a equação temos:

$$X_o(f) = X(f) + X^2(f) + X^3(f) + X^4(f) + \dots \quad (1.64)$$

de volta no domínio do tempo:

$$x_o(t) = x(t) + x(t) * x(t) + x(t) * x(t) * x(t) + \dots \quad (1.65)$$

essa equação 1.65 permite dizer que a auto-convolução da resposta total fornece a resposta impulsiva livre de múltiplas.

Podemos observar que as equações acima não consideram as características da fonte sísmica, isto é, a forma do pulso sísmico. Logo, assume-se que o traço sísmico é resultado de um impulso perfeito, o que já vimos anteriormente que não é verdade. Dessa maneira, o ideal é que, para aplicação do SRME, a resposta real impulsiva obtida seja o mais próximo

possível de um impulso perfeito. Isso só será realizável através das deconvoluções utilizadas neste trabalho, que objetivará obter o erro mínimo entre o impulso perfeito desejado e o impulso real obtido. Ao considerarmos o efeito da fonte, temos:

$$p_o(t) = x_o(t) * s(t), \quad (1.66)$$

$$p(t) = x(t) * s(t), \quad (1.67)$$

a equação 1.59 torna-se:

$$p(t) = x_o(t) * [s(t) - p(t)] = p_o(t) - x_o(t) * p(t), \quad (1.68)$$

definindo um operador de erro de predição $a(t)$, sendo ele igual à:

$$a(t) * s(t) = -\delta(t), \quad (1.69)$$

reescrevendo a equação 1.68, temos:

$$p(t) = p_o(t) + p_o(t) * a(t) * p(t). \quad (1.70)$$

O operador $a(t)$ atua como filtro de deconvolução da fonte. O efeito da refletividade da superfície é descrito pelo fator de escala -1 . A equação 1.65 incluindo o efeito da fonte, é escrita como:

$$p_o(t) = p(t) - a(t) * p(t) * p(t) + a(t) * a(t) * p(t) * p(t) * p(t) - \dots \quad (1.71)$$

A Figura 1.7 mostra a remoção de múltiplas de superfície de acordo com a equação 1.71 para o meio com apenas um refletor. A Figura (a) com todas as reflexões, tanto primárias quanto múltiplas. As Figuras (b) e (d) mostram o resultado da convolução do traço com ele mesmo. Veja que a Figura (b) mostra o resultado da primeira convolução, representando a múltipla de primeira ordem, a (c) mostra o resultado de (b) convolvido com a resposta total, representando as múltiplas de segunda ordem e assim por diante. Por causa da presença da assinatura da fonte, as múltiplas preditas não se igualam às múltiplas originais, portanto, faz se necessário a modelagem e aplicação da wavelet, como descrita na equação 1.71, uma vez para (b), duas vezes para (c) e assim por diante. E então os resultados das "convoluções deconvolidas" podem ser somados ao dado e a estimativa de um dado sem múltiplas é produzida (Figura 1.7) (Verschuur, 2006).

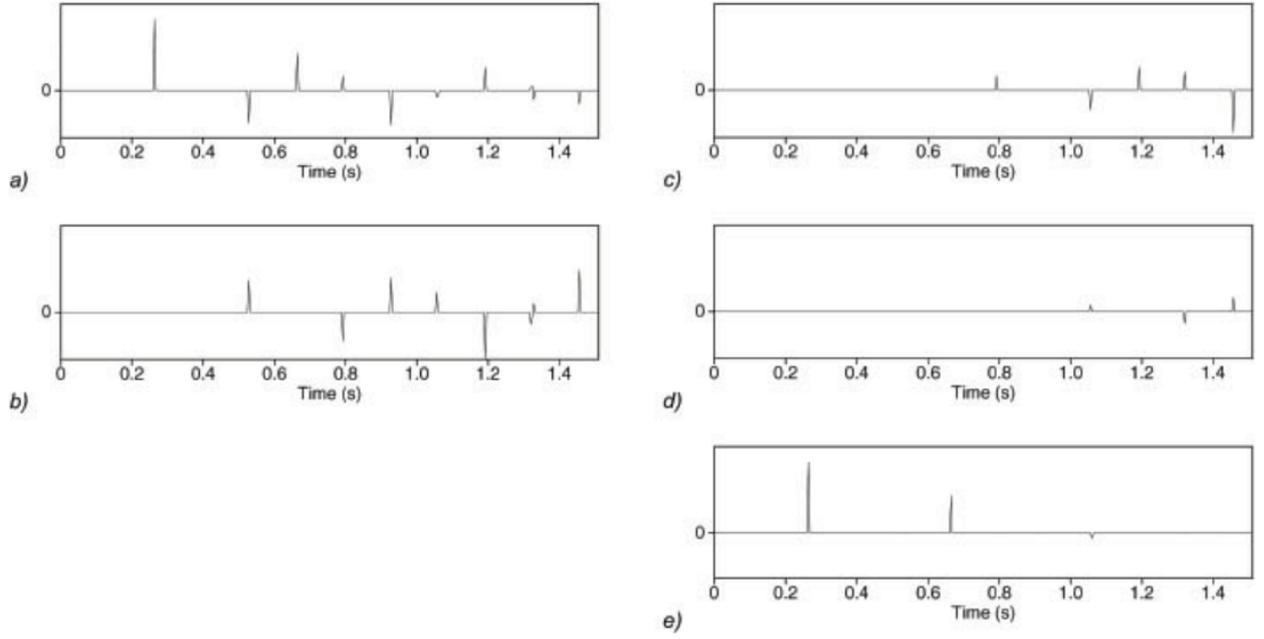


Figura 1.7: Remoção das múltiplas de superfície a partir da autoconvolução da resposta total. Em (a) resposta com duas primárias e todas as múltiplas. Em (b) a primeira múltipla é predita, obtida pela autoconvolução da resposta total. (c) A múltipla de segunda ordem é predita, obtida a partir da convolução da múltipla de primeira ordem com a resposta total. (d) A múltipla de terceira ordem. (e) O dado sem múltiplas de superfície, obtido pela soma da resposta com as predições de (a) e (d) (Verschuur, 2006).

Representando a remoção de múltiplas definida pela equação 1.71, temos:

$$P_o(f) = P(f) - A(f)P^2(f) + A^2(f)P^3(f) - A^3(f)P^4(f) + \dots, \quad (1.72)$$

onde o operador $A(f)$ é definido como:

$$A(f) = -[S(f)^{-1}], \quad (1.73)$$

Sendo $S(f)$ a transformada temporal direta de Fourier da assinatura da fonte $s(t)$.

As equações foram obtidas até o momento para a propagação unidimensional, no qual as ondas planas e horizontais interagem com um meio sem variação lateral. Porém sabemos que em subsuperfície há variações laterais, fazendo-se necessário uma reformulação de forma que possa se aproximar um pouco mais da realidade em subsuperfície. Observando a equação 1.68, é notado que as múltiplas de superfície podem ser descritas como a combinação do dado total $p(t)$ com $x_o(t)$, que no domínio da frequência equivale a multiplicação dos mesmos. Desta forma, supõe-se, na predição de múltiplas de superfície como sendo uma extrapolação do campo de onda, onde a resposta impulsiva primária, $X_o(f)$, pode ser utilizada para

descrever a trajetória da extrapolação para prever todas as múltiplas de superfície. Em modelos 2D, a predição de múltiplas de superfície parte da integral de Rayleigh (Verschuur, 2006):

$$M_o(x_r, x_s, f) = - \int_{x_k} X_o(x_r, x_k, f) P(x_k, x_s, f) dx_k, \quad (1.74)$$

onde M_o corresponde a múltipla predita para uma combinação de fonte na posição x_s e receptor na posição x_r para uma frequência f , e x_k corresponde a coordenada lateral sobre a qual o somatório acontece (Figura 1.8). É importante notar que somente trajetória de raio para um evento em X_o e um evento em P são considerados. Fazendo o somatório ao longo da coordenada x_k significa que todas as trajetórias possíveis estão sendo consideradas (Verschuur, 2006), e o sinal negativo indica que houve reflexão na superfície. Sabemos que os dados sísmico são na realidade discretos, portanto, fazendo a discretização da equação 1.68 temos:

$$M_o(x_r, x_s, f) = - \sum_{x_k} X_o(x_r, x_k, f) P(x_k, x_s, f). \quad (1.75)$$

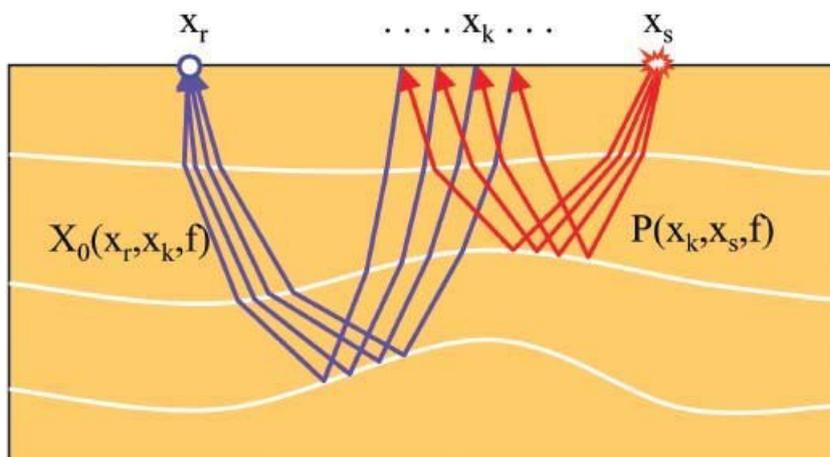


Figura 1.8: Uma múltipla de superfície de primeira ordem é construída por meio da combinação de uma família de tiro comum do dado P com uma família de receptor comum da resposta primária X_o . Essas famílias são convolvidas uma com a outra e somadas afim de se obter a múltipla predita (Verschuur, 2006).

Dessa forma, todo dado pré-empilhado para um tal componente de frequência pode ser organizado na forma de matriz (Berkhout, 2012). Essa matriz pode ser obtida através do processo ilustrado na Figura 1.9. A transformada de Fourier é aplicada em cada tiro, selecionando uma componente de frequência $f = \omega k$, em cada tiro, dos quais é obtido um vetor coluna onde cada número complexo é a medida do receptor.

Se o processo se repetir para todas as combinações de fonte e receptor para uma certa

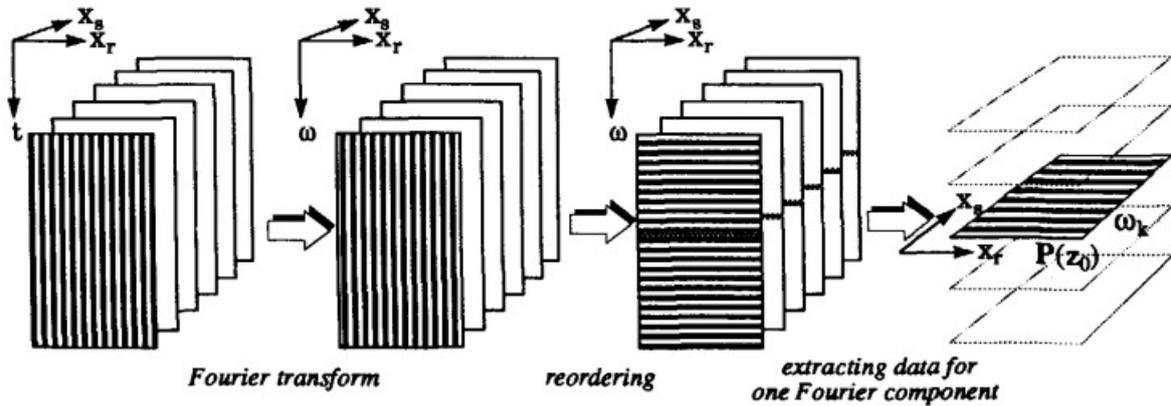


Figura 1.9: Estruturação das matrizes de dados (Verschuur, 2006).

frequência, podemos descreve-lo como:

$$M_o = -X_o P \tag{1.76}$$

A equação 1.69 representa um elemento da matriz M , na qual é construída a partir da notação da Figura 1.10, portanto, cada elemento em M é obtido pela combinação de uma linha X_o com uma coluna de P . Na Figura 1.10 cada coluna contém famílias de tiro comum, cada linha possui famílias de receptor comum e cada interseção indica um número complexo que é a resposta sísmica para uma combinação fonte-receptor. Onde esse processo ocorre de forma iterativa partindo como estimativa inicial o próprio dado total.

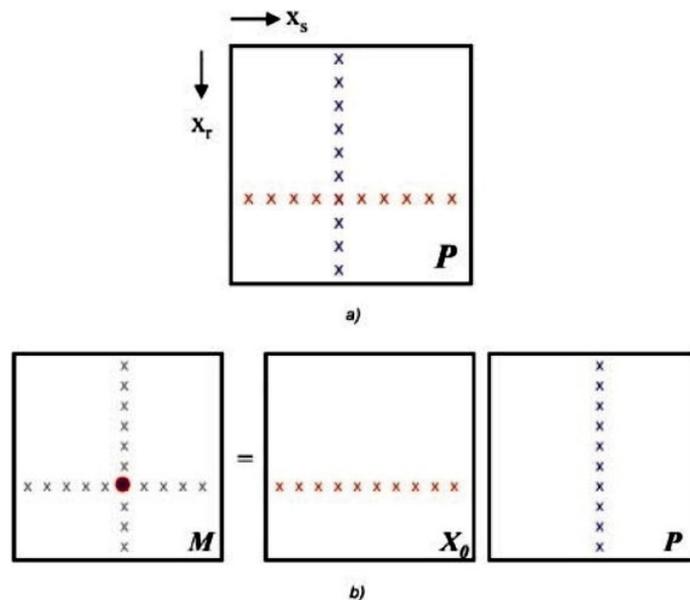


Figura 1.10: Notação matricial para estruturação do dado pré-empilhado $P(x_r, x_s, f)$ na matriz P . Em (b) mostra a predição de múltiplas sendo descrita com uma multiplicação de matrizes (Verschuur, 2006).

Capítulo 2

Metodologia

Neste capítulo será apresentado o principal fluxograma utilizado para a realização de todo o processamento sísmico da linha marítima 2D proveniente da Bacia de Jequitinhonha, bem como informações acerca da localização, geologia, tipo de levantamento e geometria de aquisição. O processamento da linha foi realizado utilizando o *software* ProMax/*SeisSpace* desenvolvido pela *Landmark Graphics Corporation*. Através desse *software* é possível organizar os fluxogramas para cada etapa do processamento. Os métodos de deconvolução foram desenvolvidos pela linguagem FORTRAN.90. As etapas de aplicação das deconvoluções foram realizadas usando o pacote *Seismic Unix* SU (Cohen e Stockwell, 1997), desenvolvido pelo *Center for Wave Phenomena-Colorado School of Mines*.

2.1 Localização e geologia

A linha 2D foi adquirida em uma região localizada na costa sul da Bahia, entre as bacias sedimentares de Almada e Cumuruxatiba. A Bacia de Jequitinhonha é uma bacia terrestre-marítima, sendo que a maior parte de sua área está na região marítima conforme podemos ver nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3. De uma área de 10.000 Km^2 , apenas 500 Km^2 pertencem a região terrestre. Dos 9.500 Km^2 submersos, 7.000 Km^2 possui a lâmina d'água com profundidade até 1.000m e, 2.500 Km^2 , a lâmina d'água se encontra no intervalo de 1.000m à 2.000m (Santos et al., 1994). Na região de plataforma marítima então, a batimetria varia de 50m à 3.000m de profundidade (Mohriak, 2003). O embasamento da bacia consiste em granitos e gnaisses.

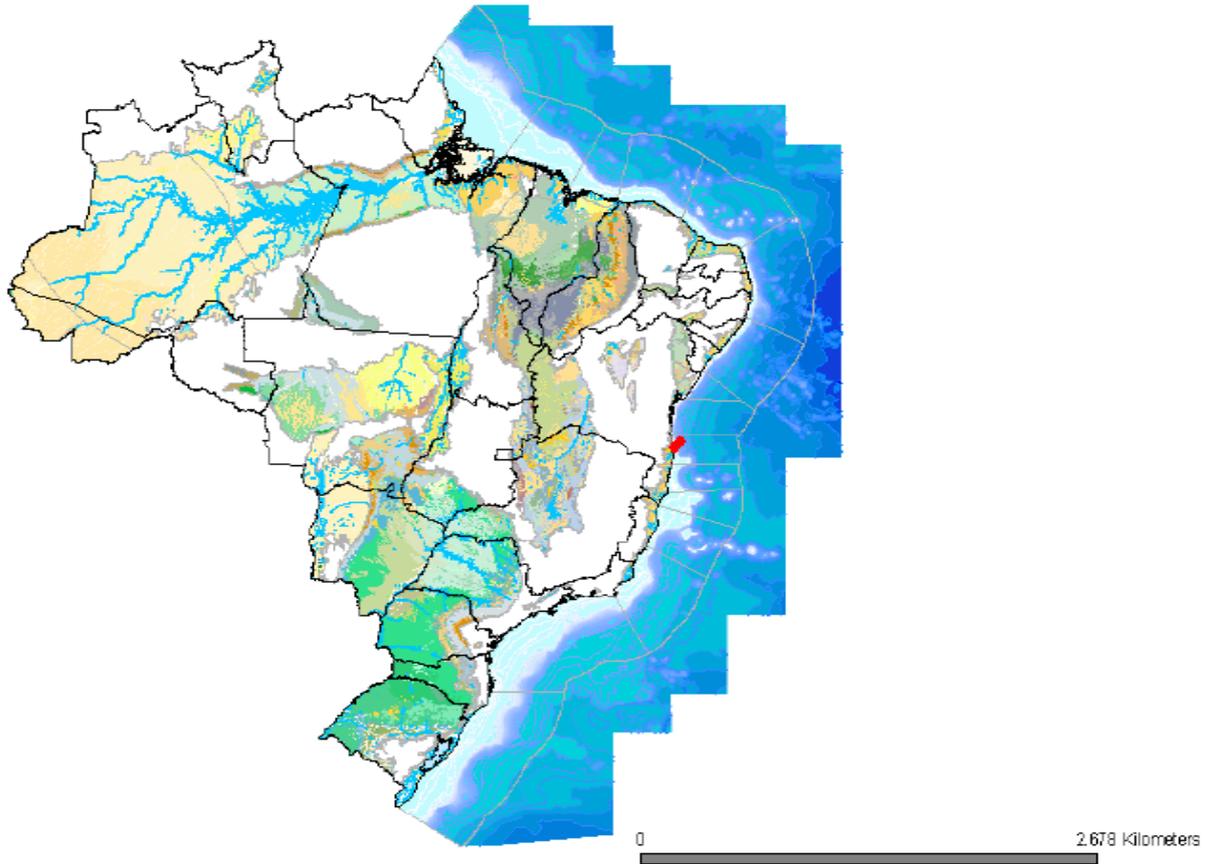


Figura 2.1: Ponto vermelho identificando a localização da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha. Fonte: ANP(2011).

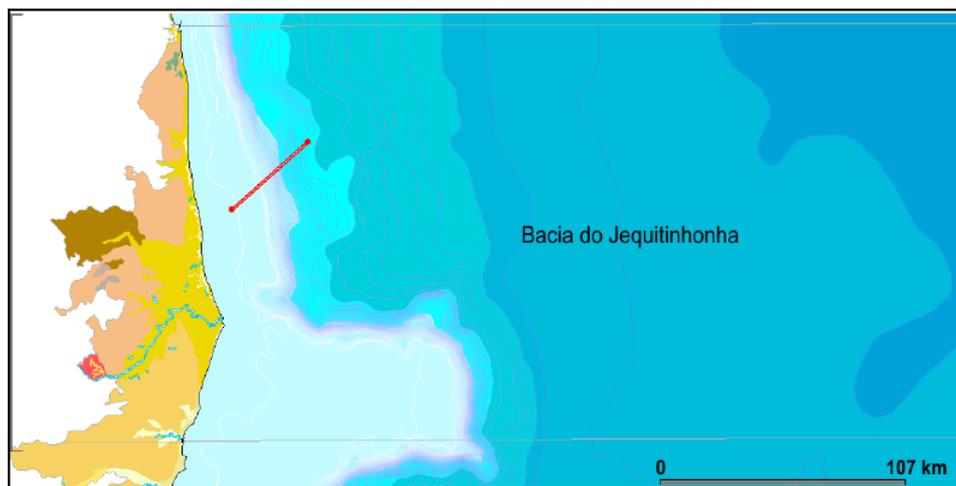


Figura 2.2: A linha vermelha indica o local do levantamento da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha. Fonte: ANP(2011)

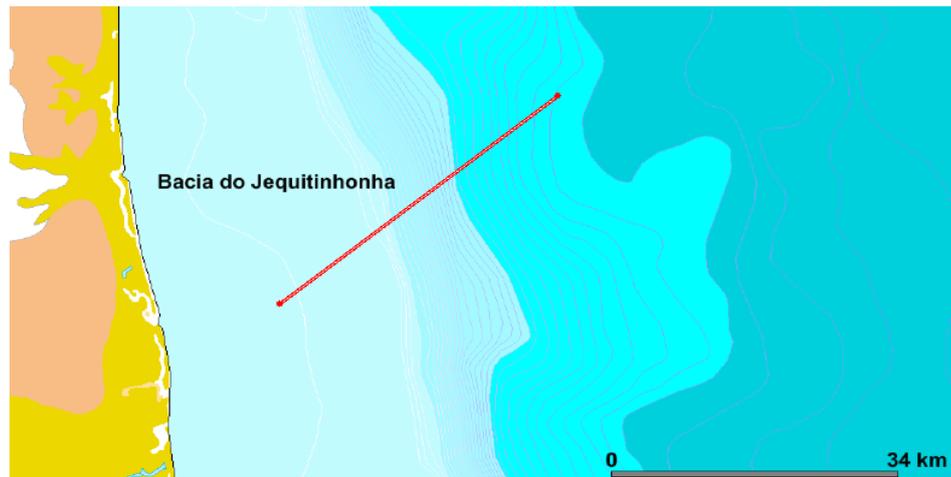


Figura 2.3: A linha vermelha indica o local do levantamento da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha representada agora em maior escala. Fonte: ANP(2011)

A estrutura estratigráfica da bacia é caracterizada pelas formações:

- Grupo Nativo - Consiste na Formação Mariricu com dois membros distintos: O Membro Mucuri formado por sedimentos clásticos grosseiros e finos sedimentos do ambiente fluvial-lacustrino da idade Alagoas, e o Membro Itaúnas caracterizado pelos evaporitos neoalagoas representados por um ambiente marinho de circulação restrita;
- Grupo Barra Nova - Consiste em duas formações. A Formação São Mateus representada por sedimentos clásticos grosseiros depositados pelos leques deltaicos e a Formação Regência que consiste em carbonatos de alta e baixa energia do ambiente nerítico. Esse grupo foi datado como Albiano e Cenomaniano;
- Grupo Espírito Santo - Consiste em três formações. A Formação Rio Doce caracterizada por arenitos grosseiros do terciário provenientes de leques costeiros. A Formação Caravelas consiste em carbonatos neríticos do terciário de alta e baixa energia. A Formação Urucutuca é formada por pelitos grosseiros e arenitos neo-Cretáceos e terciários depositados nas encostas e na base.
- Formação Barreiras - É a cobertura clástica neo-Cenozoica da porção terrestre.

A geologia dessa região é complexa, e muitos eventos geológicos tais como, rift e tectônica, ocorridos durante um longo período na separação dos continentes, interferiram na topografia. A tectônica complexa é demonstrada na Figura 2.4.

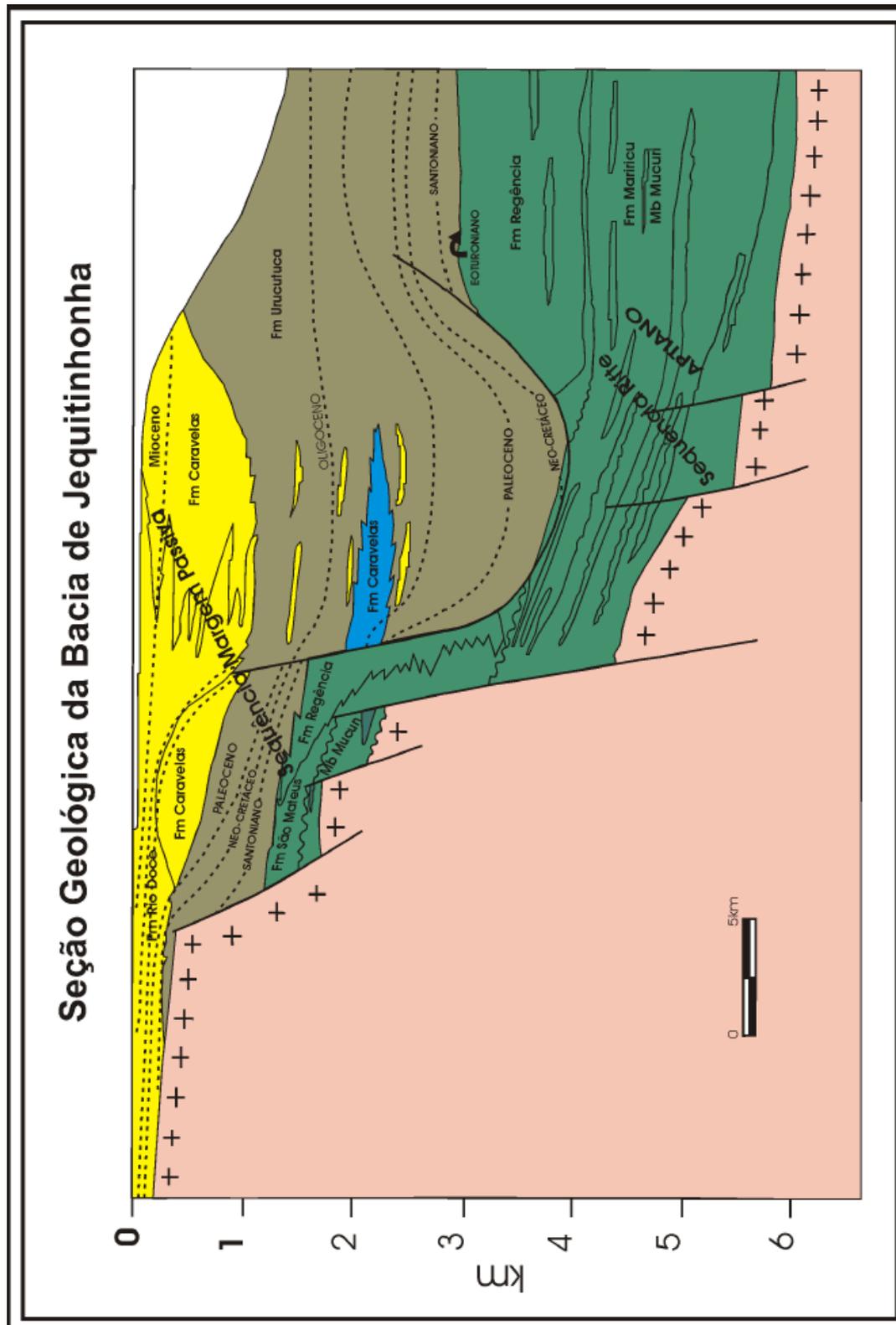


Figura 2.4: Seção Geológica da Bacia de Jequitinhonha. Fonte: CPRM(2011)

2.2 Geometria de aquisição

A aquisição da linha sísmica marinha foi realizada por um navio que arrasta um conjunto de fontes, canhões de ar (*air-gun*), seguido de um cabo (*streamers*) contendo hidrofones. Esse tipo de aquisição é chamado de arraste de cabo marinho (*Mariner Tower Streamer*).

A linha utilizada neste trabalho identificada como 66, é uma linha 2D perpendicular a região entre as plataformas continental e marítima, cuja distância entre o ponto de tiro e os hidrofones, isto é, o lanço, é de 3125m. O detalhamento da geometria de aquisição é apresentado na Tabela 2.1..

Tabela 2.1: Configuração do levantamento da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha.

Especificações	Dados
Número de receptores	120
Intervalo entre receptores	25m
Profundidade do cabo	10.5m
Número de tiros	1577
Intervalo entre tiros	25m
Profundidade da fonte	9m
Tempo de registro	7s
Afastamento mínimo	150m
Afastamento máximo	3125m
Extensão do levantamento	39.425m
Discretização	4ms

A parte rasa da linha 66 apresenta diversos tipos de múltiplas, porém o foco do trabalho está na parte mais profunda, já que essa região apresenta múltiplas de superfície livre identificadas a partir de 1000ms que serão atenuadas na filtragem SRME.

2.3 Fluxograma do processamento

Para aplicação do fluxo de atenuação de múltiplas de superfície utilizando SRME, os dados foram deconvolvidos e previamente processados. O objetivo principal deste capítulo é descrever as etapas do pré-processamento sísmico realizado, e as etapas do processamento sísmico envolvendo as deconvoluções utilizadas e a filtragem SRME. A Figura 2.5 representa o fluxograma do processamento sísmico, onde parte das etapas foram desenvolvidas no

PROMAX (*software Seisspace*) e parte desenvolvidas no SU, utilizando a linguagem FORTRAN.90.

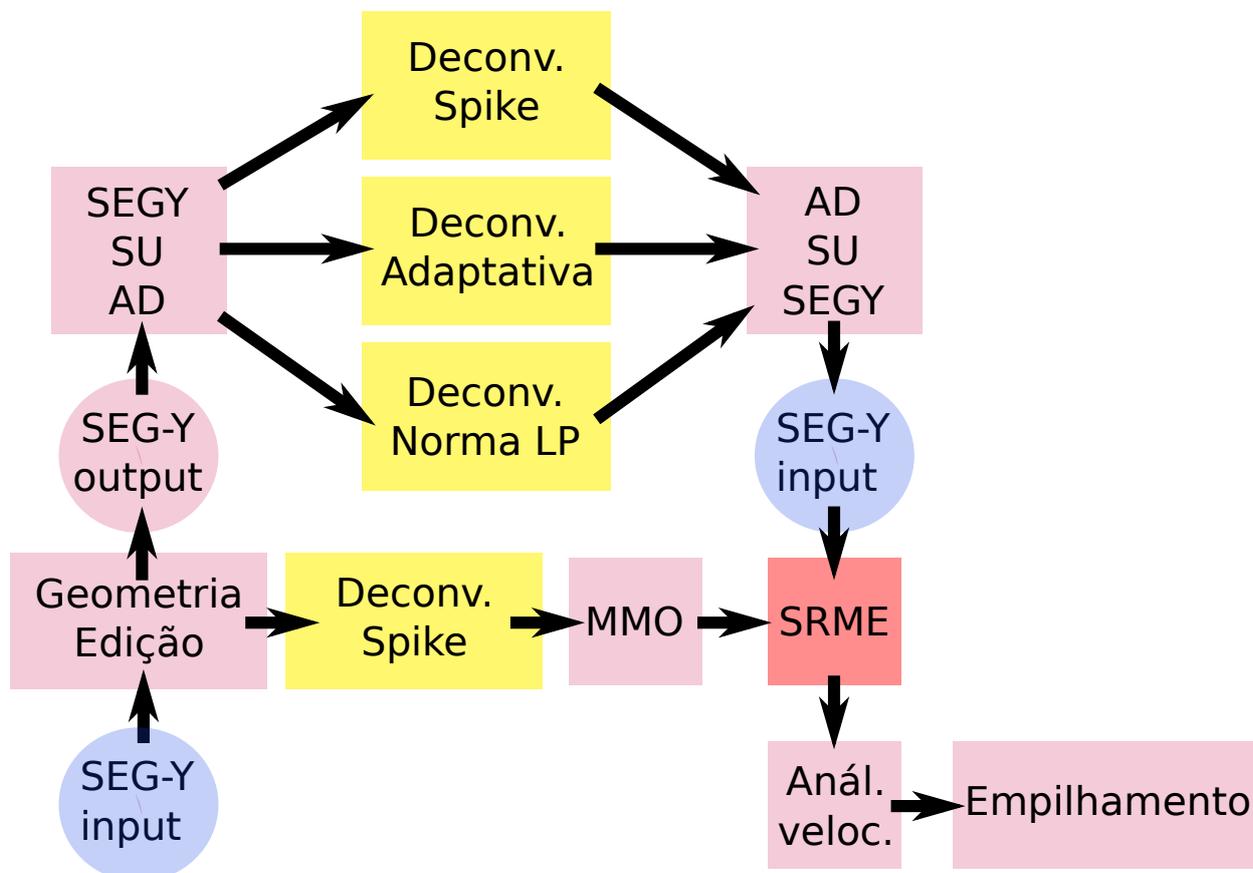


Figura 2.5: Fluxograma adotado para o processamento sísmico.

2.3.1 Conversão de formato

Atualmente, os formatos mais utilizados para os dados sísmicos registrados em campo são o SEG-Y e o SEG-D. Para o PROMAX é necessário uma conversão deste formato para um formato compatível com o *software*. Essa é a primeira etapa do pré-processamento.

2.3.2 Geometria

Para aplicação da geometria no dado sísmico é necessário o conhecimento do arranjo utilizado na aquisição, das posições dos pontos de tiro, das posições dos receptores, e dos valores de offset. Todas essas informações são obtidas pelo geofísico a partir do relatório do observador. Além dessas informações, é possível obter também a quantidade de tiros e canais, e a cobertura. Essa etapa é crucial para o pré-processamento sísmico, uma vez que, qualquer erro pode ocasionar muitos problemas nas próximas etapas do processamento. Todas as informações obtidas são gravadas no header de cada traço, dessa forma é possível organizar

o dado em famílias de ponto médio comum. A montagem da geometria 2D realizada no trabalho ocorre por meio de preenchimento de tabelas do *Seispace* (vide Figura 2.6).

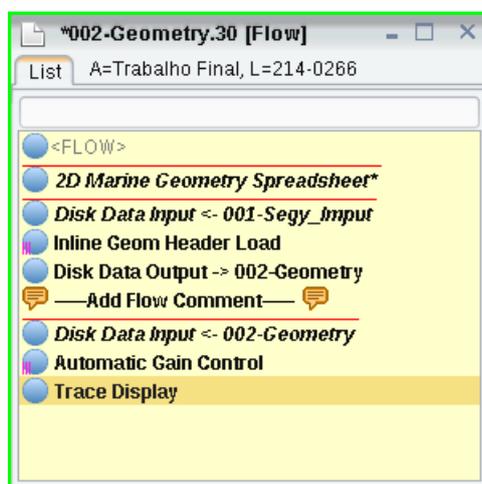


Figura 2.6: Fluxo adotado para montagem da geometria no *Seispace*.

2.3.3 Edição

Na etapa de edição é possível zerar valores de amplitudes em determinadas partes do traço sísmico. Dessa maneira, áreas que prejudicam o processamento sísmico são eliminadas. No presente trabalho realizamos um *top mute*, isto é, foi anulada a região situada entre o tempo zero e os tempos das primeiras chegadas. O *mute* no *Seispace* é obtido a partir de *picks* que determinam um limite no sismograma entre onde serão preservados os valores das amplitudes e a região onde as amplitudes serão anuladas. No PROMAX esses pontos limites são selecionados manualmente.

2.3.4 Deconvoluções

O objetivo do trabalho se encontra parcialmente nesta etapa. As deconvoluções testadas foram desenvolvidas tanto pelo *Software Seispace*, quanto pela aplicação da linguagem FORTRAN.90. No PROMAX testamos apenas o módulo da deconvolução *spiking* disponível. Já no FORTRAN.90 foram desenvolvidas a deconvolução *spiking*, a deconvolução com norma L_p e a deconvolução adaptativa.

Nesta etapa, foi necessário uma segunda conversão de formato. Desta vez convertendo do formato do PROMAX para o formato SEG-Y. Assim, foi possível através do comando *segypread* converter o dado SEG-Y para SU (*Seismic Unix*). Por fim, com o dado em SU, utilizando o comando *sustrip* o convertemos em AD, isto é, o formato ideal para aplicação do código FORTRAN.90. Após a aplicação de todas as deconvoluções, o dado resultante

foi novamente convertido para SU com o comando *supaste* e novamente para SEG-Y com o comando *segypwrite*. Dessa maneira, foi possível entrar novamente com o dado no *Seispace*, porém agora o dado estará deconvolvido.

Deconvolução *spiking*

O fluxo da deconvolução *spiking* executado no PROMAX pode ser visualizado na Figura 3.2. O grande obstáculo encontrado na deconvolução realizada pelo *software* ocorreu na escolha do número de coeficientes do filtro. O módulo de deconvolução desenvolvido pelo PROMAX não permite essa alteração. De modo que todo o funcionamento do código e o processo do cálculo do filtro são omitidos do processador. Dessa maneira foi impossível manipular os parâmetros da deconvolução de modo a obter o erro mínimo.

Ao contrário da deconvolução *spiking* desenvolvida no PROMAX, na linguagem FORTRAN.90, essa deconvolução pôde ser inteiramente manipulada. O filtro de Wiener-Levinson foi testado utilizando vários coeficientes. Porém, percebeu-se que quando o número de coeficientes era superior a 2, o método atuava de forma severa, destruindo muita informação importante para o processamento o que torna a sua aplicação inviável para o aumento da resolução temporal.

Portanto a deconvolução *spiking* com melhor resultado ocorreu utilizando-se o número de coeficientes igual a 1, já que esta foi capaz de manter um equilíbrio entre atenuar o ruído e comprimir as reflexões de interesse.

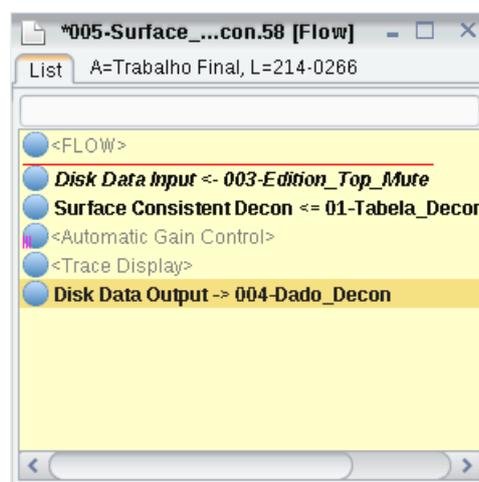


Figura 2.7: Fluxo adotado para a aplicação da deconvolução no *Seispace*.

Deconvolução com norma L_p

A eficiência da deconvolução utilizando norma L_p pelo FORTRAN.90 dependerá também do número de coeficientes do filtro, porém além dos coeficientes, dois parâmetros são

inseridos a mais para a avaliação do método, o valor da norma L_p e o número de iterações. Assim como na deconvolução *spiking*, o filtro com número de coeficientes igual a 2 não atuou bem. Sendo assim, permaneceu-se com o número de coeficientes igual a 1.

Os valores testados da norma L_p se situam no intervalo de 1 a 2, sendo 2 o valor da norma L_p que resulta na deconvolução *spiking* convencional utilizando o filtro de Wiener-Levinson. O melhor resultado obtido para a norma L_p utilizou o valor da norma igual a 1, isto é, o erro foi minimizado realizando o somatório do valor absoluto. A medida que crescia o número de iterações o resultado da deconvolução aumentava. Logo, o número máximo de iterações com o melhor resultado foi igual a 100.

Deconvolução adaptativa

A deconvolução adaptativa teve como primeiro passo passar os dados para o domínio do CMP. Na aplicação do código FORTRAN.90 é possível alternar o número de coeficientes e o número de canais para o caso da deconvolução adaptativa multicanal. Devido a utilização de janelas fixas em tempo, o número de coeficientes que melhor apresentou resultados permaneceu sendo 1, e o número de canais que apresentou melhor resolução resultou no caso da deconvolução adaptativa monocanal, ou seja, número de canais igual a 1. O pequeno número de canais pode representar o fato de que os traços apresentam muito ruído e ao realizar uma média entre canais, esse ruído pode ter sido acentuado.

2.3.5 Análise de velocidade da múltipla - MMO

A etapa de análise de velocidade MMO é realizada com o objetivo de fornecer a velocidade da múltipla que corrige a sobretempo normal para a aplicação da filtragem SRME. Quando a técnica CMP é empregada e as velocidades são corretamente estimadas, é possível aumentar a razão sinal-ruído e reduzir ruídos com periodicidade. No *software Seisspace* a análise de velocidades é feita utilizando o espectro de velocidades. Dessa forma, ao selecionar o ponto de maior coerência para a primeira reflexão no espectro de velocidades é possível horizontalizar a reflexão de superfície e todas as suas múltiplas.

2.3.6 *Surface related multiple elimination* - SRME

O resultado da filtragem SRME torna-se melhor a medida que temos o dado de entrada o mais próximo possível do ideal. Sabemos que o SRME considera o pulso sísmico como um pulso unitário, o que não é verdade. Portanto, as múltiplas não podem ser estimadas adequadamente. Devido a isso, a atenuação de múltiplas torna-se limitada, e artefatos como a deconvolução devem ser utilizados.

O SRME é um processo de filtragem no qual as informações necessárias para sua aplicação encontra-se no próprio dado em processamento. Dessa maneira, algumas circunstâncias não ideais que os dados podem apresentar e que devem ser contornadas são: falta de *offsets*, amostragem de fonte espaçada e dados ruidosos.

Amostragem irregular de fontes e receptores

Os dados de entrada para aplicação do SRME devem ser adquiridos com posições de fonte e receptor coincidentes, ou seja, as fontes e receptores devem ter amostragem regulares e iguais. Caso isto não ocorra, é necessário uma interpolação dos tiros, resultando em traços regularmente amostrados tanto para fontes quanto para receptores.

Ausência de pequenos *offsets*.

Uma característica das aquisições marinhas é a não aquisição de dados até o *zero-offset* (Verschuur, 2006), isso devido à operacionalidade da aquisição. Para a predição de múltiplas é necessário que os pequenos *offsets* sejam preenchidos. Logo, uma interpolação para pequenos *offsets* pode ser determinante para o sucesso do SRME. Verschuur, em 2006, propôs aplicar uma correção NMO no domínio CMP, repetir o *offset* mínimo até o *zero-offset* e aplicar a NMO inversa, isso considerando, variações laterais e verticais suaves e que o *offset mínimo* não seja muito grande. Reorganizando o dado, temos o dado no domínio do tiro interpolado até o *zero-offset*.

Na linha da Bacia de Jequitinhonha, o espaçamento entre os tiros e o espaçamento entre os receptores são iguais a (25m) e o *offset mínimo* é (150m). Logo o preenchimento do dado até o *zero-offset* torna-se possível sem maiores complicações, pois o *offset mínimo* é múltiplo do espaçamento entre os receptores.

Adição de informação além do *zero-offset*

Dados marinhos utilizam, normalmente, o arranjo *end-on* para aquisição do dado sísmico. Esse tipo de arranjo apresenta problemas na aplicação do SRME quando o meio geológico é complexo. Na Figura 2.8a o ponto de reflexão na superfície está entre as posições de fonte e receptor considerados, ou seja, esta múltipla pode ser predita pela combinação de um receptor do tiro em questão com um traço localizado na posição indicada pela estrela laranja (Verschuur, 2006). Assim, os traços necessários para a obtenção da predição estão presentes no intervalo de *offsets* medidos.

Entretanto, quando o modelo é mais complexo, o ponto de reflexão na superfície pode estar fora do arranjo de aquisição, do outro lado da fonte (Figura 2.8b). Logo, o traço da

fonte secundária (laranja) está no intervalo de aquisição, mas trajeto da fonte principal até a secundária (azul) não está presente no dado (Verschuur, 2006). Logo para a predição, é necessário traços além do *zero-offset* (Figura 2.9a), e esses traços serão obtidos a partir da fonte secundária pelo princípio da reciprocidade.

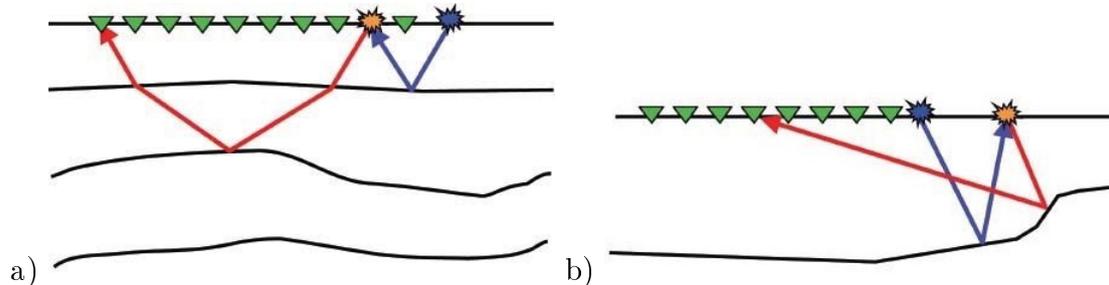


Figura 2.8: a) Modelo simples onde a fonte secundária (em laranja) está dentro do arranjo. b) Modelo complexo onde a fonte secundária (em laranja) está fora do arranjo e assim o caminho inicial (azul) não é medido.

Pelo princípio da reciprocidade o dado deve ser espelhado em relação a diagonal principal (área azul claro da Figura 2.9b). As coordenadas são colocadas em função da fonte e do receptor. A região central, próxima aos *zero-offsets*, é interpolada (região rosa da Figura 2.9b), porém apenas uma pequena porção dos traços (linha tracejada da Figura 2.9b) é necessária para a predição de múltiplas nos *offsets* originais.

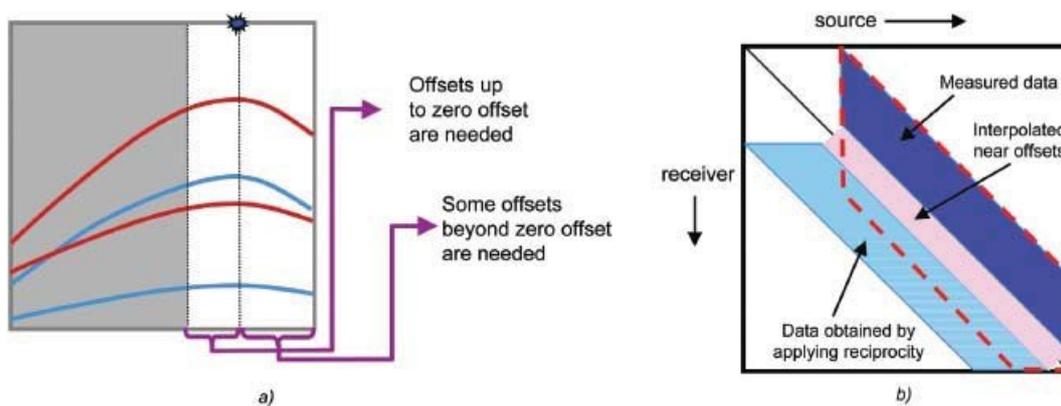


Figura 2.9: a) Quando o arranjo é do tipo *end-on*, os *offsets* do dado original, indicado pela área de cinza, precisam ser extrapolados para além do *zero-offset*. b) A área azul indica os dados medidos. A área azul claro indica os dados que podem ser obtidos pelo princípio da reciprocidade. A área em rosa indica os dados extrapolados até o *zero-offset*. Para a predição de múltiplas a área em vermelho tracejada é suficiente (Verschuur, 2006).

Aplicação do SRME no PROMAX

Para a predição do dado após sua regularização e deconvolução, utilizamos o módulo *SRME Macro*. O dado de entrada são os tiros regularizados e deconvolvidos, e a saída é a estimativa da múltipla. Após essa predição, o dado original e a múltipla predita são colocados em um mesmo fluxo, utilizando os módulos *Disk Data Input* e *Disk Data Insert*. A múltipla é então trazida para a geometria original da aquisição. Essa etapa é feita usando o módulo *SRME Un-Regularization*. Esse módulo funciona de forma contrária ao módulo *SRME Regularization*. O dado de entrada para o SRME pode não ser ideal por razões como: variação da forma da *wavelet*, efeitos residuais da fonte/receptor fantasma, etc. Essas imperfeições no dado de entrada irá resultar em uma amplitude estimada falsa quando comparada com a múltipla do dado original com respeito a amplitude, fase e forma da *wavelet*. Para compensar esses efeitos é utilizado o *SRME Match Filter* para determinar e aplicar um filtro correspondente a cada tiro na estimativa do ruído.

O módulo *SRME Adaptive Subtraction* é responsável por fazer a subtração do dado original pela múltipla predita. Esse módulo envolve a concepção e aplicação de filtros temporais ao ruído com o objetivo de preservar o sinal desejado e atenuar as múltiplas. Afim de ajudar a garantir que o filtro adaptativo está escolhendo o ruído na estimativa do ruído no dado original, ele pode ser útil para projetar o filtro pela média das correlações necessárias espacialmente. Isto é fornecido com o parâmetro *Spatial averaging size*. Se o dado contém alta amplitude e energia anômalas, o filtro adaptativo pode tentar reduzir esta energia e distorcer severamente a estimativa do ruído. Para reduzir esta possibilidade desta distorção significativamente do sinal estimado, pode ser prudente a restrição da magnitude permitida dos coeficientes do filtro. Este parâmetro é o *Maximum filter coefficient*. Os outros parâmetros são: o *Temporal window length*, este parâmetro não pode exceder o período da múltipla, nem dever ser muito pequeno pois terá uma grande chance de escolher a energia da múltipla para subtrair do sinal; e o último parâmetro é o *Filter length*, este não pode ser maior que 20% do *Temporal window length*. Segundo o *help* do *Seisspace* a largura do filtro maior que 100 ms degrada o resultado.

O fluxo adotado na aplicação do SRME no PROMAX pode ser visualizado na Figura 2.10.

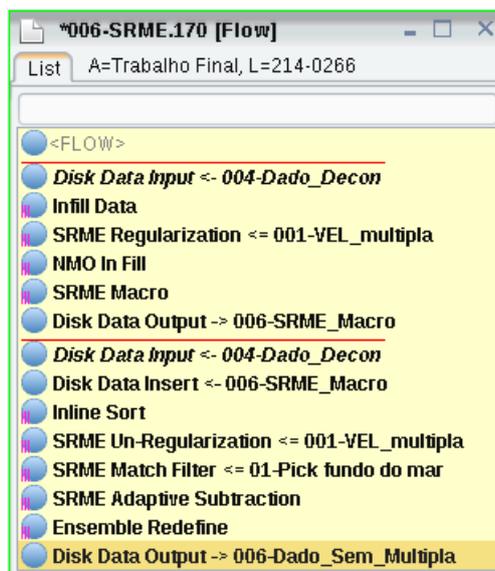


Figura 2.10: Fluxo adotado para a aplicação do SRME no *Seispace*.

2.3.7 Análise de velocidade final

A etapa de análise de velocidade final é realizada com o objetivo de fornecer um modelo das velocidades em subsuperfície que corrige o efeito da sobretempo normal. Essa etapa é fundamental para o processamento sísmico, já que a qualidade da seção sísmica empilhada dependerá da precisão na determinação dessas velocidades. A organização em CMP's nesta etapa resulta numa redundância de dados sísmicos que amostram o mesmo ponto em profundidade, aumentando a razão sinal-ruído. No *software Seispace* a análise de velocidades é feita utilizando o espectro de velocidades, como vimos anteriormente, que são calculados por medidas de coerência. Quando os traços de uma família CMP já estão corrigidos e horizontalizados, eles são somados, e teremos um traço de afastamento nulo, ou *zero-offset*. Na Figura 2.11 é possível observar um exemplo do espectro de velocidades obtido a partir do CMP 2975 do dado bruto. Podemos constatar também uma região de velocidade muito baixa em tempos maiores, esse padrão de coerência no espectro determina locais com presença de múltipla. A velocidade da múltipla terá o mesmo valor da velocidade da primeira reflexão, porém em tempos dobrados em relação ao tempo da primeira reflexão. A análise de velocidade final, que permitiu o empilhamento de todas as seções sísmicas que serão apresentadas nos resultados, seguiu o fluxo apresentado na Figura 2.12, onde podemos notar que um processo de suavização do campo de velocidade obtido também foi necessário e ocorreu através do módulo *Velocity Manipulation*.

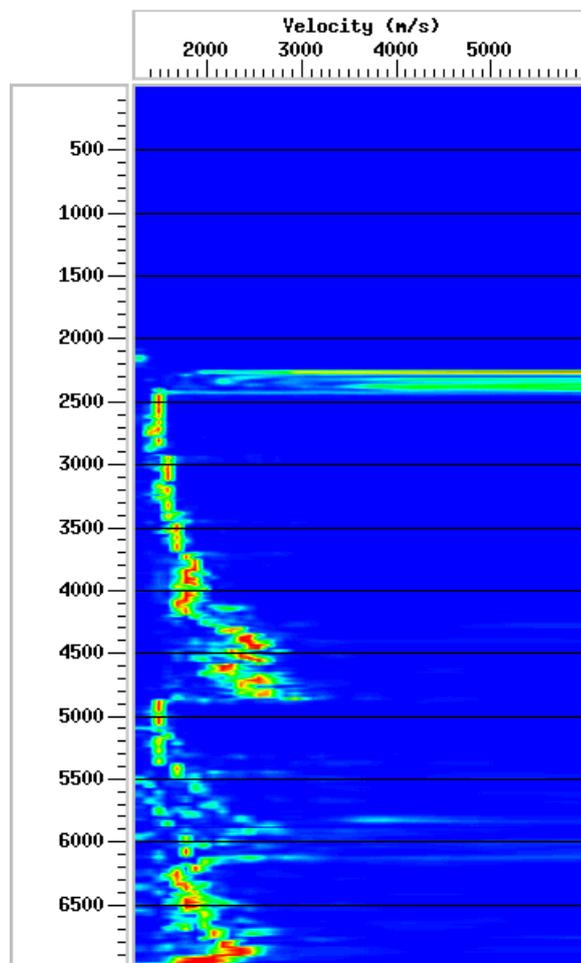


Figura 2.11: Espectro de velocidades calculado a partir de medidas de coerência do CMP 2975 do dado bruto no *Seispace*.

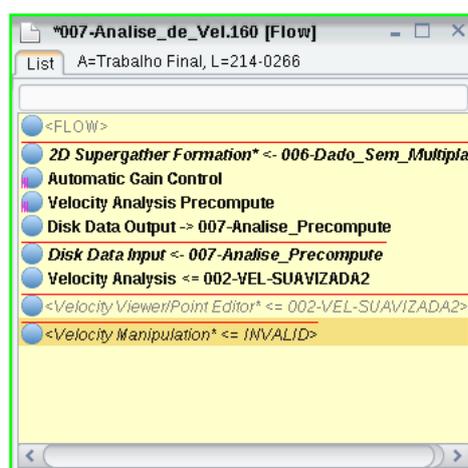


Figura 2.12: Fluxo adotado para a análise de velocidade no *Seispace*.

2.3.8 Seção empilhada

Nesta etapa é realizada a soma aritmética das amplitudes dos traços das famílias CMP's, após a correção do sobretempo normal. A melhora da razão sinal-ruído dos dados, nesse caso, dependerá do grau de coerência alcançada nos eventos de interesse (reflexões) (Silva, 2004). O fluxo de empilhamento realizado no PROMAX depende diretamente da análise de velocidade final (vide Figura 2.13). Na análise de velocidades final, utilizando como dado de entrada o dado filtrado de SRME, gerou-se o campo de velocidades utilizado para o empilhamento de todas as seções sísmicas do trabalho. Este campo é gerado com o módulo *Velocity Viewer/Point Editor* onde é feita uma interpolação linear dos valores de velocidade, analisados durante os *picks* de velocidade. O campo de velocidades gerado no *Seisspace*, pode ser visualizado na Figura 2.14.

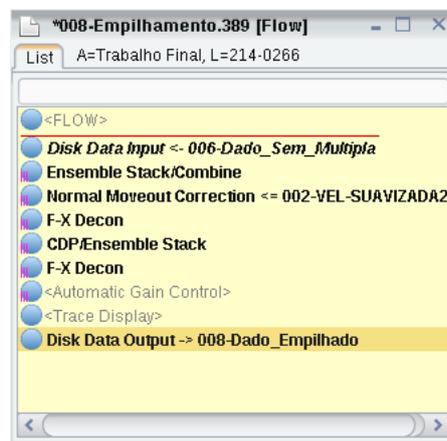


Figura 2.13: Fluxo adotado para o empilhamento no *Seisspace*.

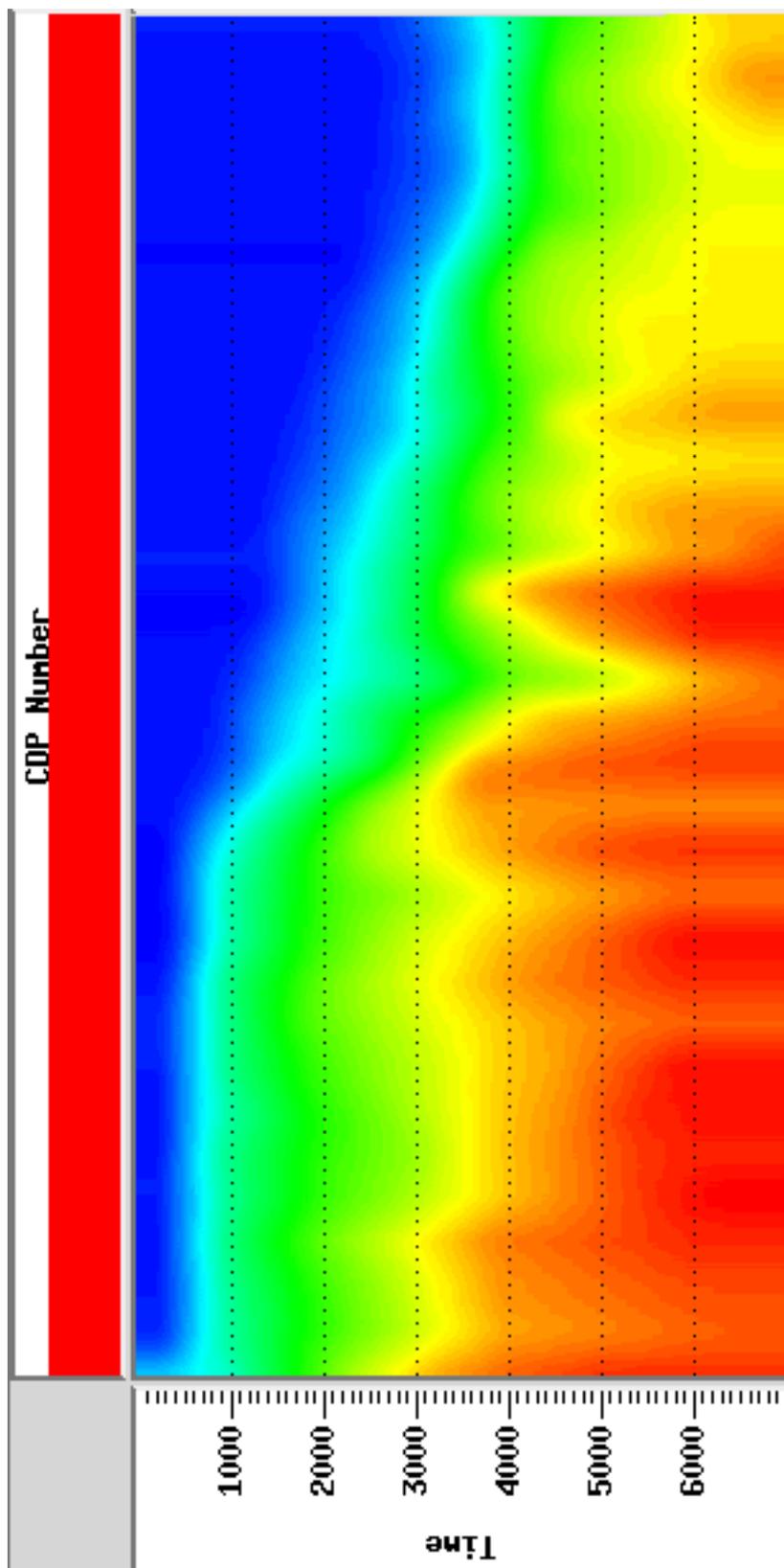


Figura 2.14: Campo de velocidade suavizado obtido a partir da etapa de análise de velocidade.

Capítulo 3

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados alcançados através do método de filtragem SRME, utilizando as deconvoluções adaptativa, *spiking*, e com norma L_p .

A abordagem utilizada foi avaliar cada deconvolução dentro de sua particularidade, melhorar a qualidade da análise de velocidades através da remoção de múltiplas, mostrar que a filtragem SRME está associada com a deconvolução do traço, e por fim associar o melhor resultado da filtragem com aquele melhor de deconvolução. Os resultados são sempre comparados com o dado original (Figura 3.25), com a finalidade de analisar as melhorias alcançadas. Serão apresentados no trabalho também, a plotagem dos espectros de amplitude e os efeitos causados nos espectros de velocidade.

Tendo em vista que esse trabalho buscou testar e comparar a eficiência das técnicas de deconvolução na filtragem SRME, algumas outras etapas que são conhecidas como fundamentais na obtenção de uma alta resolução temporal e espacial não foram realizadas, tal como a migração.

3.1 Deconvolução

A deconvolução *spiking* (Figura 3.1) foi testada para vários coeficientes, mas percebeu-se que o melhor resultado era obtido quando o número de coeficientes era igual a 1. Quando o número de coeficientes foi maior que 1 a filtragem atuou de maneira muito severa.

A deconvolução *spiking* (Figura 3.2) realizada no *Seispace* não permitiu a alteração de parâmetros, como o número de coeficientes do filtro. Dessa maneira, essa filtragem realizada através do *software* foi a única não satisfatória.

A deconvolução de norma L_p (Figura 3.3) foi avaliada por meio do número de coeficientes do filtro, o valor da norma L_p e o número de iterações. Utilizou-se uma norma com $p = 1$ e o número de iterações igual a 100. Quando o número de coeficientes era maior que 1 a

deconvolução de norma L_p também atuava de forma severa.

A deconvolução adaptativa (Figura 3.4) foi testada utilizando janelas de tempo fixas, e número de coeficiente fixo. O caso da deconvolução monocanal obteve melhores resultados que a multicanal, pois algumas regiões no caso multicanal apresentaram ruídos grosseiros de baixa frequência. Dessa maneira os parâmetros escolhidos foram número de coeficientes igual a 1 e número de canais igual a 1.

Para aplicação das deconvoluções, o dado foi organizado no domínio CMP com o objetivo de diminuir o efeito da não estacionaridade. Os resultados das deconvoluções apresentam eventos bem definidos na seção sísmica empilhada. Embora todos os resultados desenvolvidos pela linguagem FORTRAN.90 tenham sido satisfatórios, podemos observar que a seção que melhor apresentou a compressão do pulso sísmico está associada a deconvolução utilizando norma L_p .

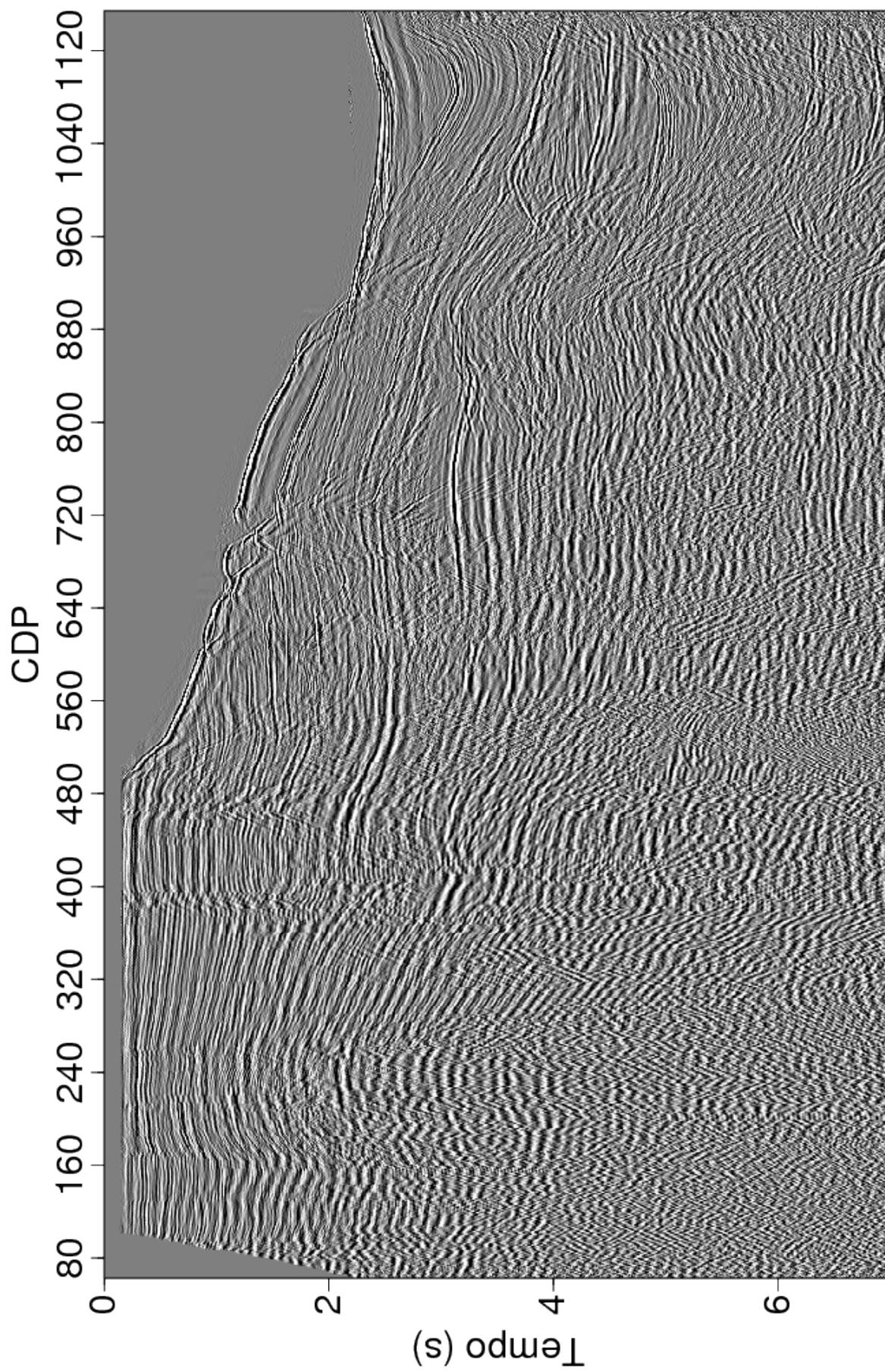


Figura 3.1: Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução *spiking* aplicada pela linguagem FORTRAN.

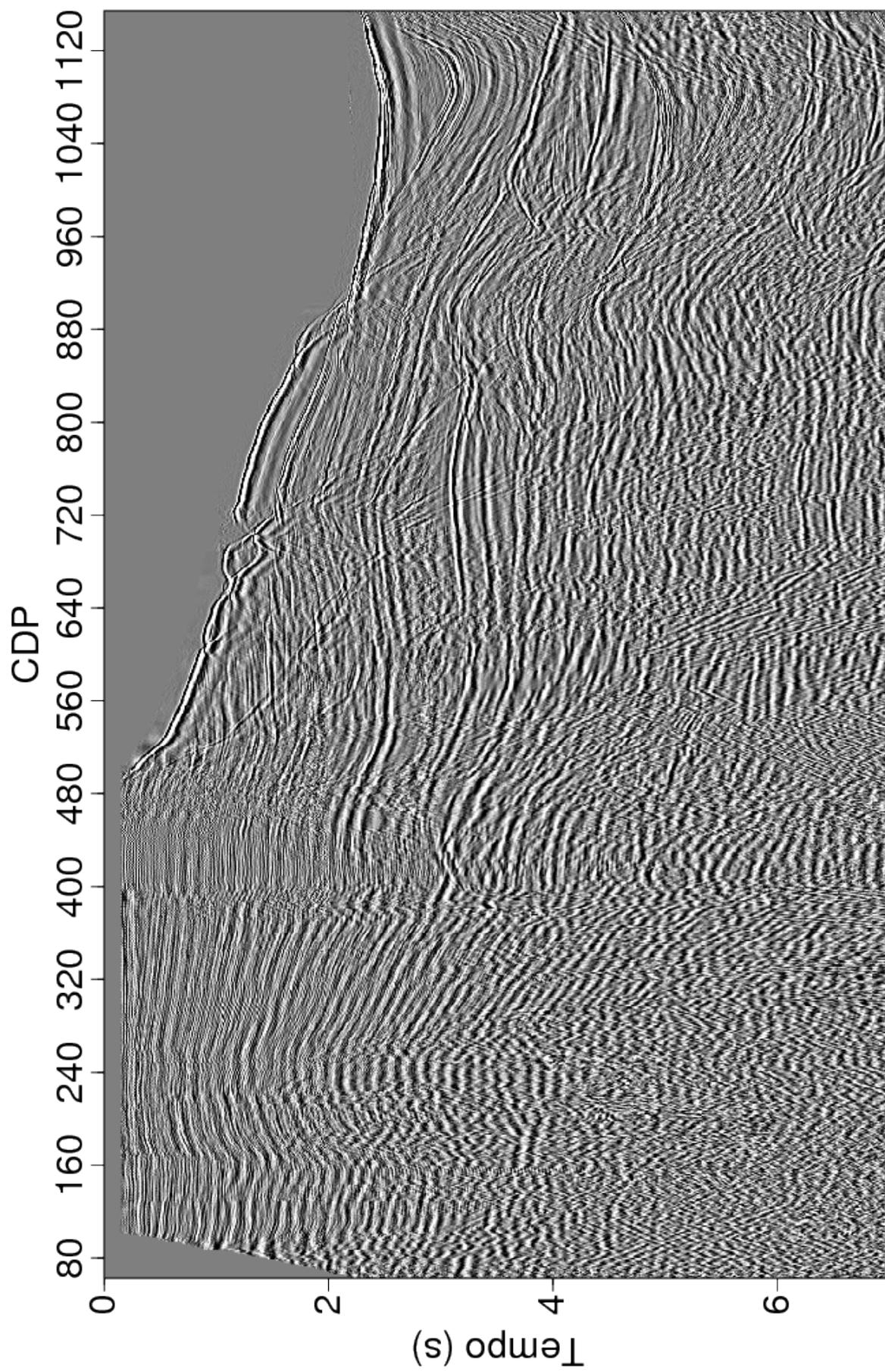


Figura 3.2: Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução *spiking* aplicada pelo software *Seispace*.

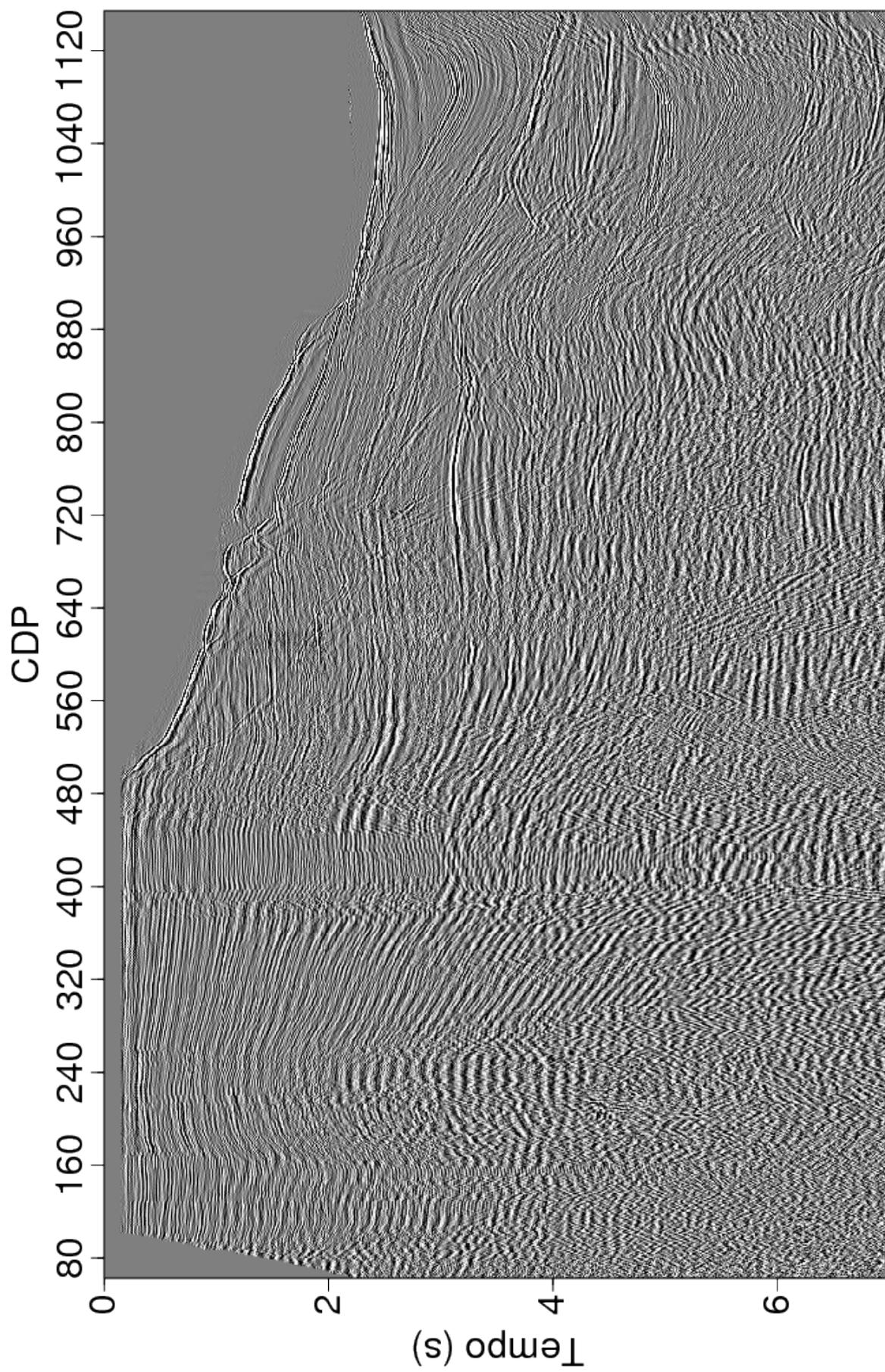


Figura 3.3: Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução com norma L_p .

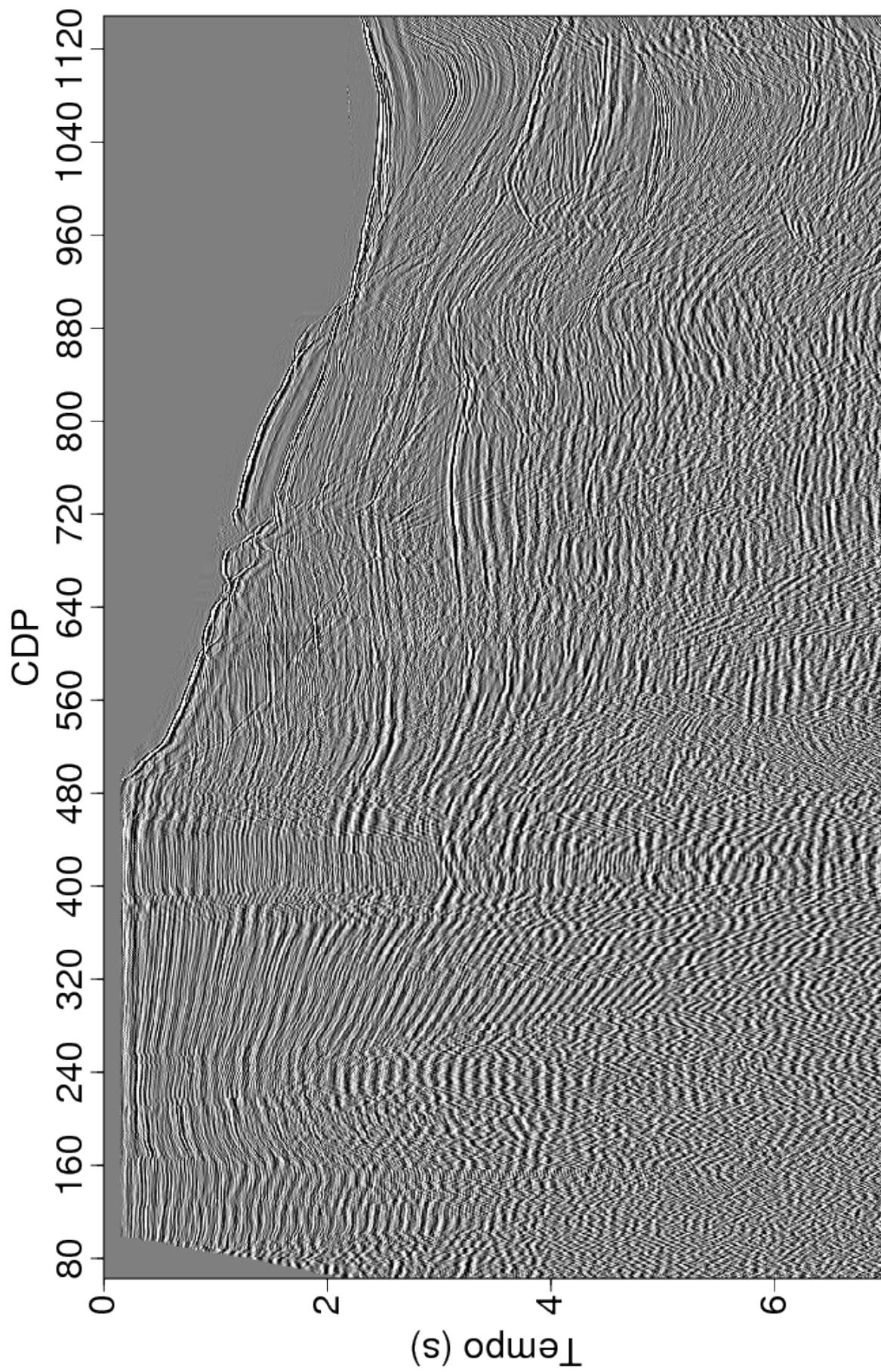


Figura 3.4: Seção empilhada utilizando a velocidade final, resultante da deconvolução adaptativa.

3.1.1 Influência no Espectro de Amplitude

Um resultado importante de se analisar para as deconvoluções é o espectro de amplitude. Analisando os espectros de cada deconvolução no FORTRAN.90 (Figuras 3.6, 3.7, 3.8) é possível notar um realce nas informações contidas na banda de frequência acima de 35Hz em relação ao dado original (Figura 3.5). Esse resultado é consistente com o objetivo da deconvolução que é tentar obter de volta a função refletividade. O espectro de amplitude da deconvolução realizada no PROMAX (Figura 3.9) possui uma banda de frequência muito anômala quando comparada com o original. Isso é resultado da adição de ruídos que ocorreu no *software* gerando uma seção mal deconvolvida.

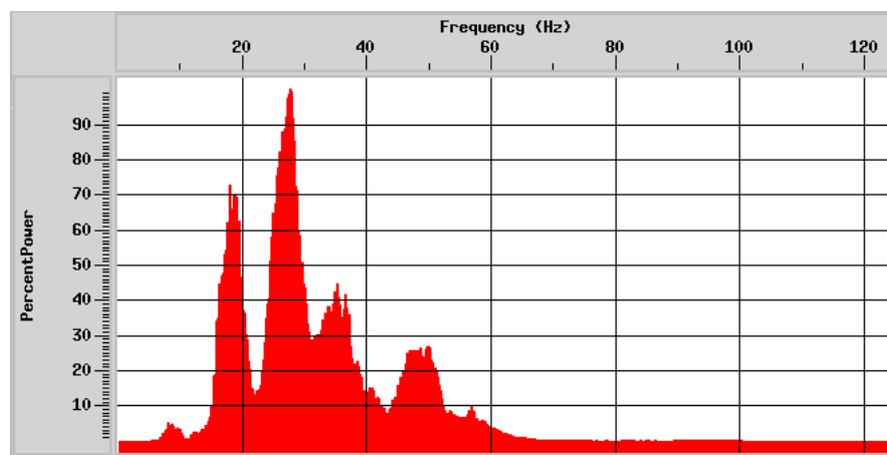


Figura 3.5: Espectro de amplitude do dado bruto.

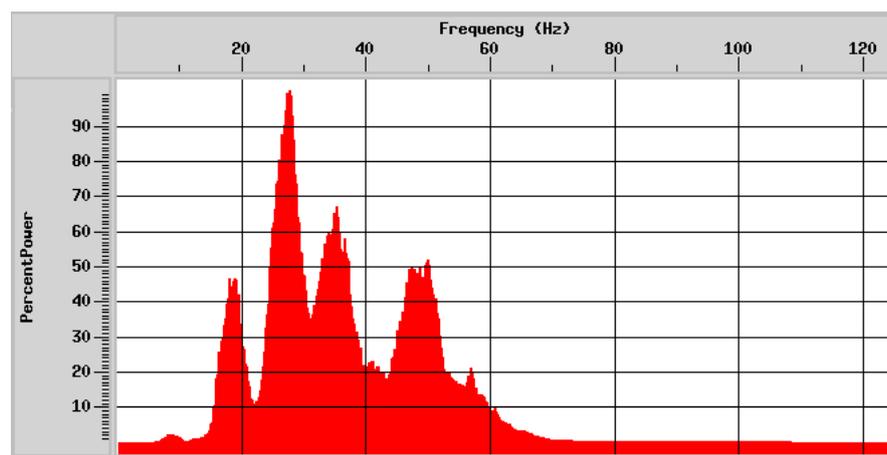


Figura 3.6: Espectro de amplitude da deconvolução *spike* desenvolvida no FORTRAN.

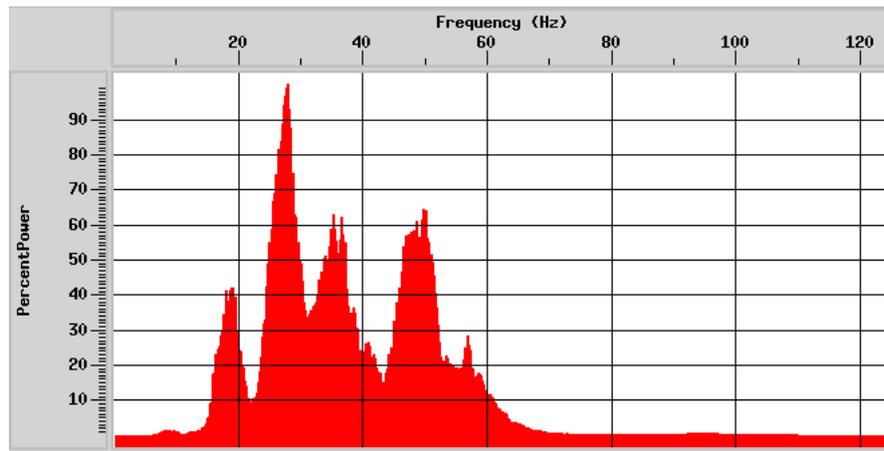


Figura 3.7: Espectro de amplitude da deconvolução adaptativa desenvolvida no FORTRAN.

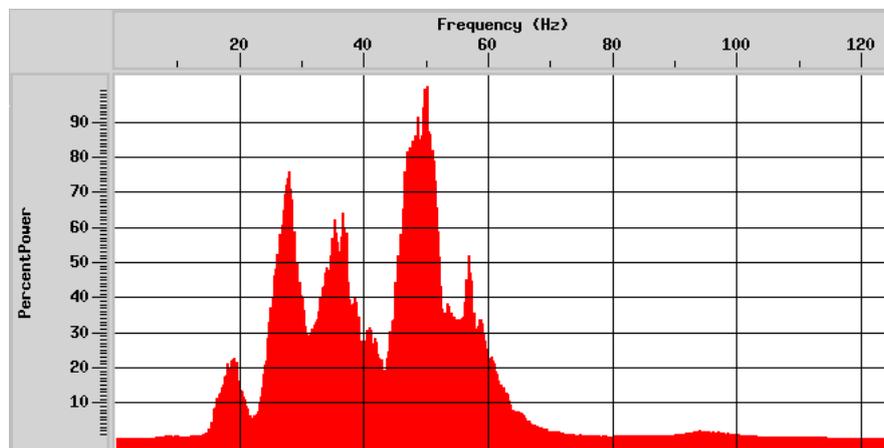


Figura 3.8: Espectro de amplitude da deconvolução com norma L_p desenvolvida no FORTRAN.

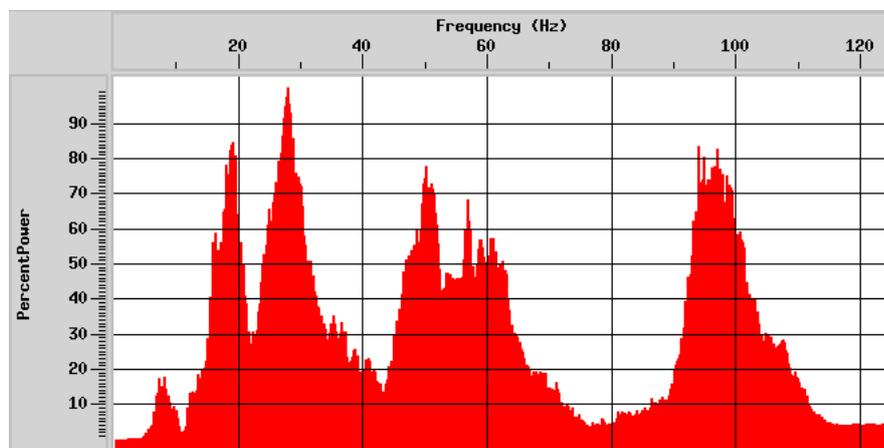
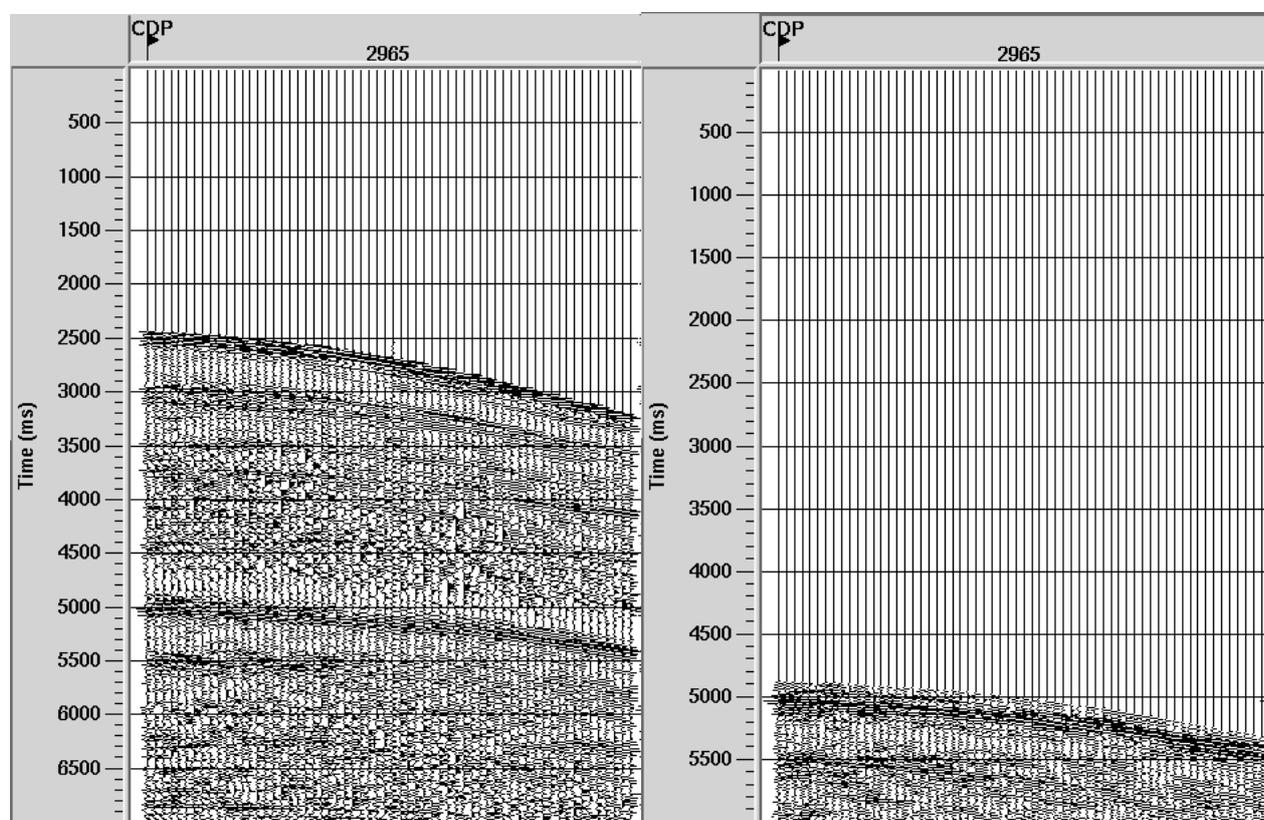


Figura 3.9: Espectro de amplitude da deconvolução spike desenvolvida no Seispace.

3.2 *Surface Related Multiple Elimination - SRME*

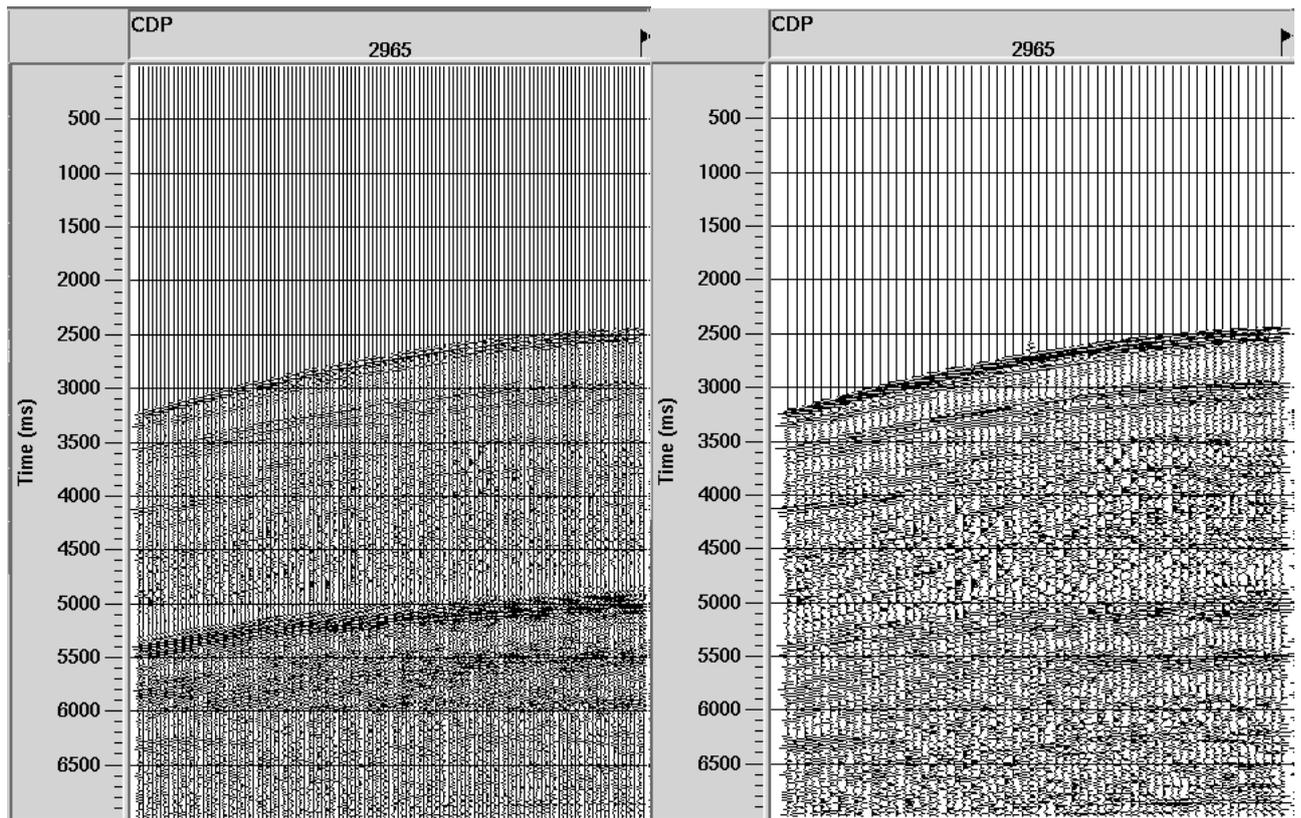
Após a regularização do dado utilizando o módulo *SRME Regularization* (Figura 3.10a), o fluxo do *software Seispace* inicia a predição da múltipla utilizando o módulo *SRME Macro* (Figura 3.10b). A saída obtida então é a estimativa da múltipla com a geometria igual ao dado de entrada. Em seguida o dado retorna para sua geometria original. O módulo *SRME Match Filter* (Figura 3.11a) procura corrigir defeitos de amplitude, fase e forma da *wavelet* da múltipla predita em relação a original. Por fim, o dado original é subtraído pela múltipla predita utilizando o *SRME Adaptive Subtraction* (Figura 3.11b).



(a) Dado após a aplicação do *SRME regularization*.

(b) Dado após a aplicação do *SRME Macro*.

Figura 3.10: Primeiras etapas da filtragem SRME.



(a) Dado após a aplicação do *SRME Match Filter*.

(b) Dado após a aplicação do *SRME Adaptive Subtraction*.

Figura 3.11: Últimas etapas da filtragem SRME.

As seções recortadas e empilhadas utilizando a segunda análise de velocidade (Figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16), e localizadas na região delimitada da figura 3.12 foram utilizadas com o objetivo de mostrar os efeitos das deconvoluções na filtragem SRME.

Com o intuito de testar os diferentes métodos apresentados, separamos o CMP 2965, da linha 214-RL-0266 da Bacia de Jequitinhonha, pois esse CMP apresenta as múltiplas de superfície livre bem definida assim como algumas reflexões. As figuras: 3.17; 3.18; 3.19; 3.20, mostram a comparação entre o CMP original e o CMP após a aplicação de cada um dos métodos abordados no trabalho.

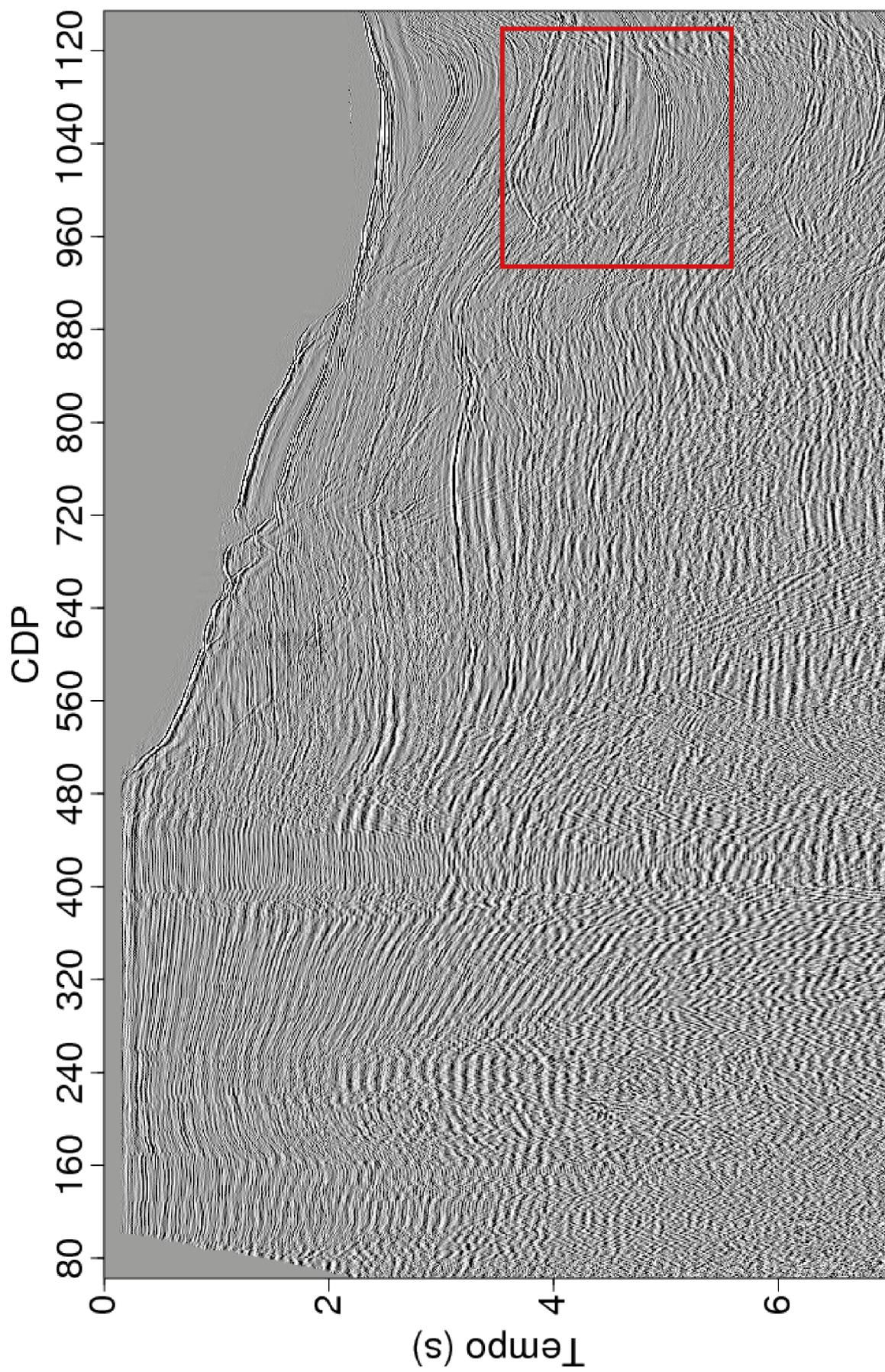
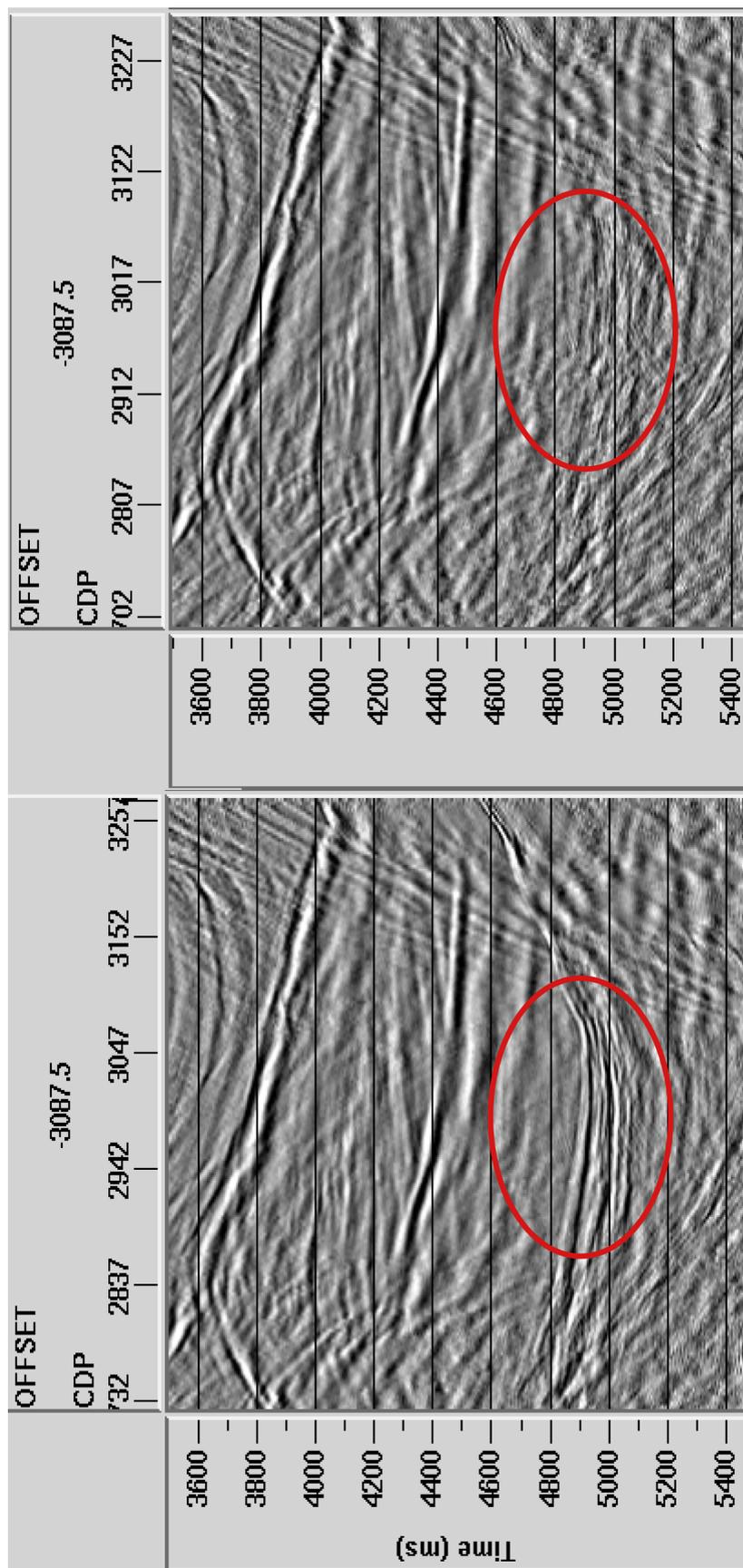


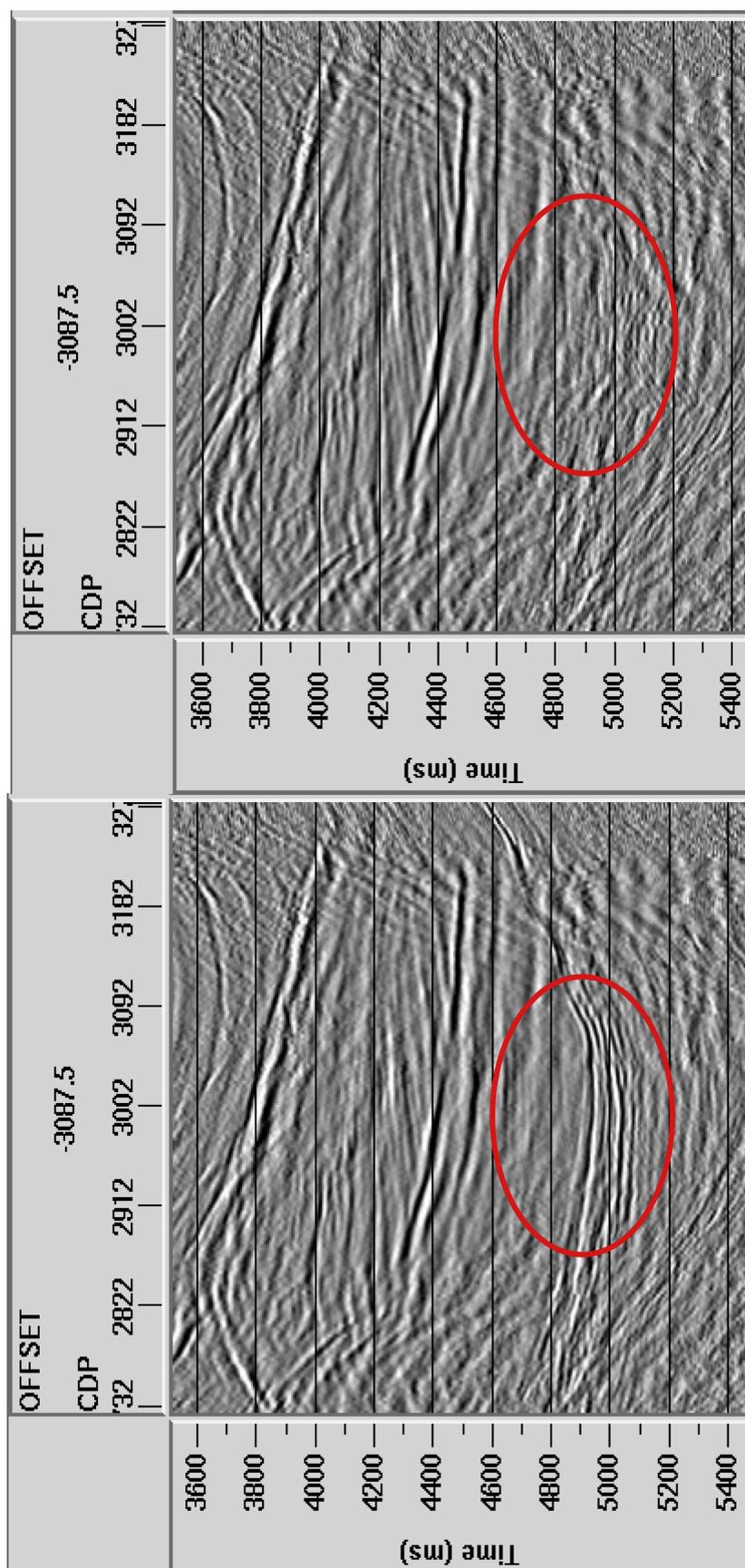
Figura 3.12: Região da seção sísmica empilhada usada para realizar a comparação entre as deconvoluções e a filtragem SRME



(a) Seção deconvolvida pelo *Seispace*.

(b) Seção deconvolvida com aplicação do SRME.

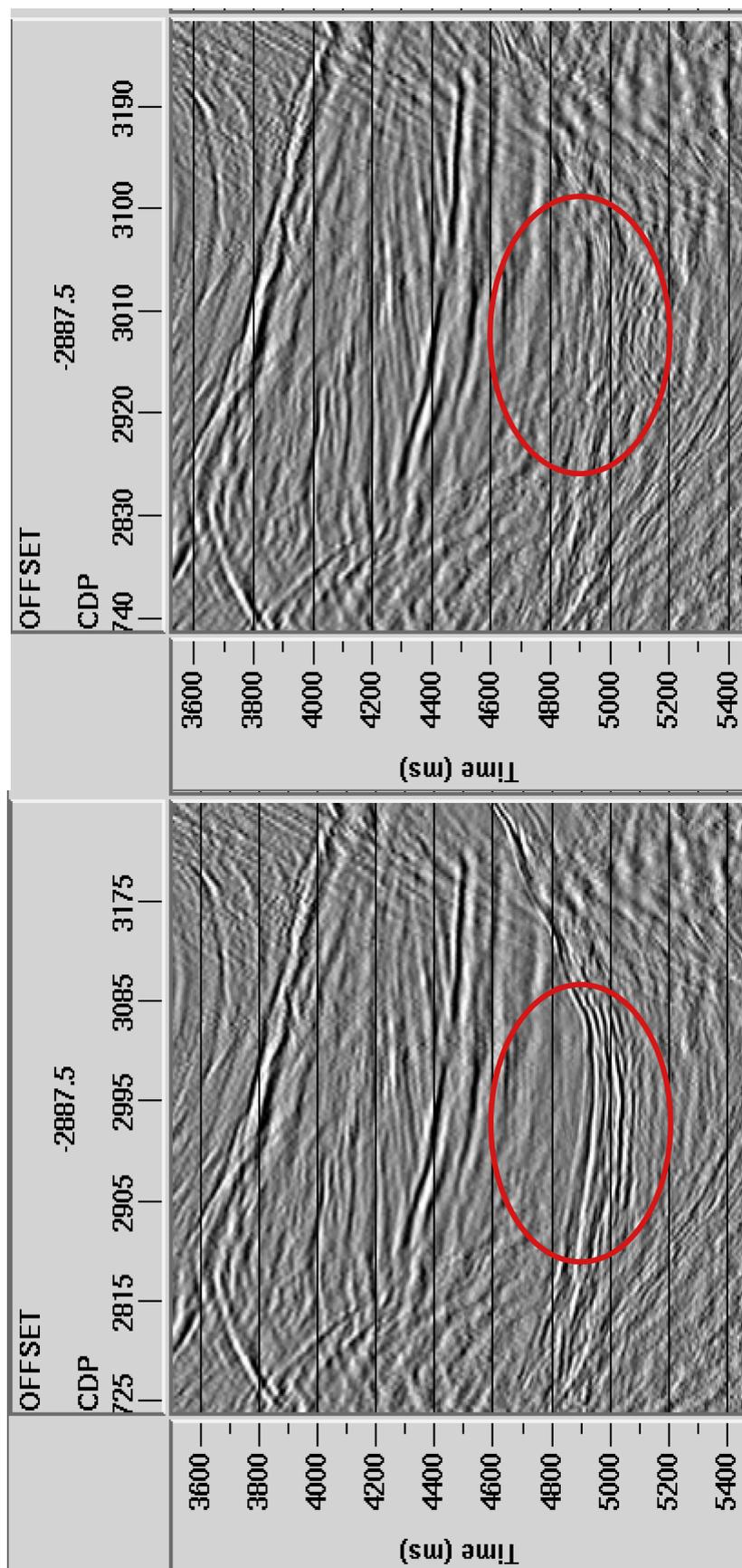
Figura 3.13: Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução do *Seispace*.



(a) Seção deconvolvida utilizando a deconvolução *spiking* no FORTRAN.

(b) Seção deconvolvida com aplicação do SRME.

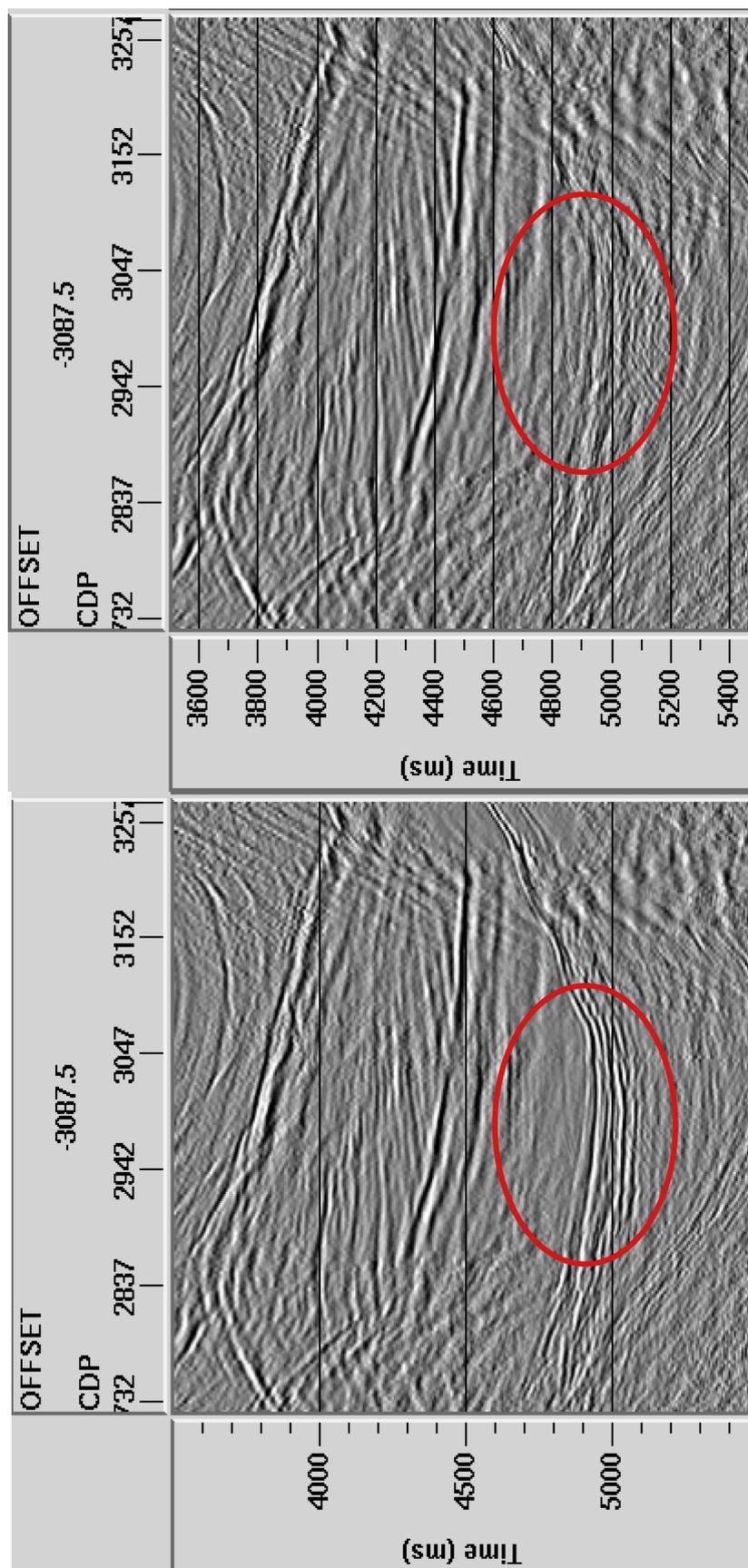
Figura 3.14: Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução *spiking* no FORTRAN.



(a) Seção deconvolvida utilizando a deconvolução adaptativa.

(b) Seção deconvolvida com aplicação do SRME.

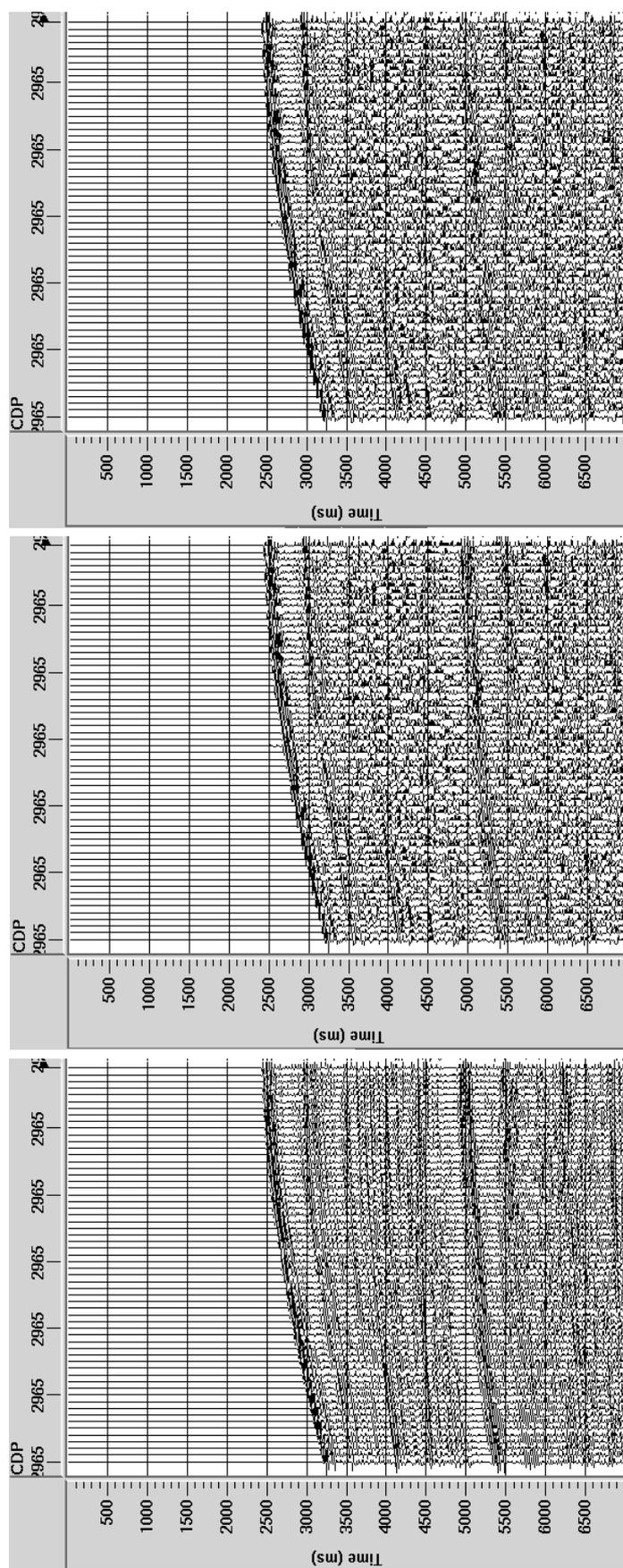
Figura 3.15: Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução adaptativa.



(a) Seção deconvolvida utilizando a deconvolução com norma L_p .

(b) Seção deconvolvida com aplicação do SRME.

Figura 3.16: Resultado do método SRME na seção empilhada para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução com norma L_p .



(a) CMP 2965 original.

(b) CMP 2965 resultado da deconvolução *spiking* no *Seisspace*.

(c) CMP 2965 filtrado de SRME.

Figura 3.17: Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução *spiking* do *Seisspace*.

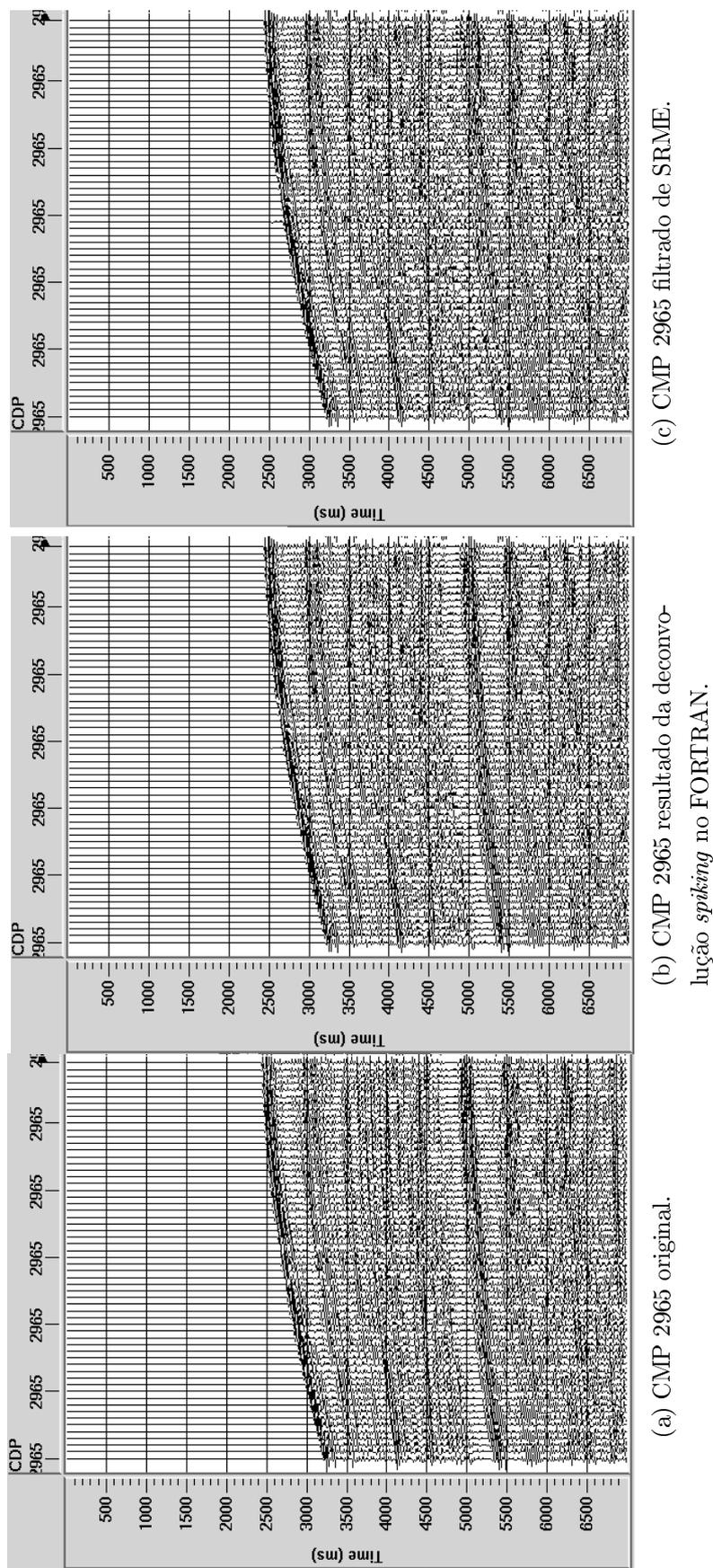


Figura 3.18: Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução *spiking* no FOTRAN.

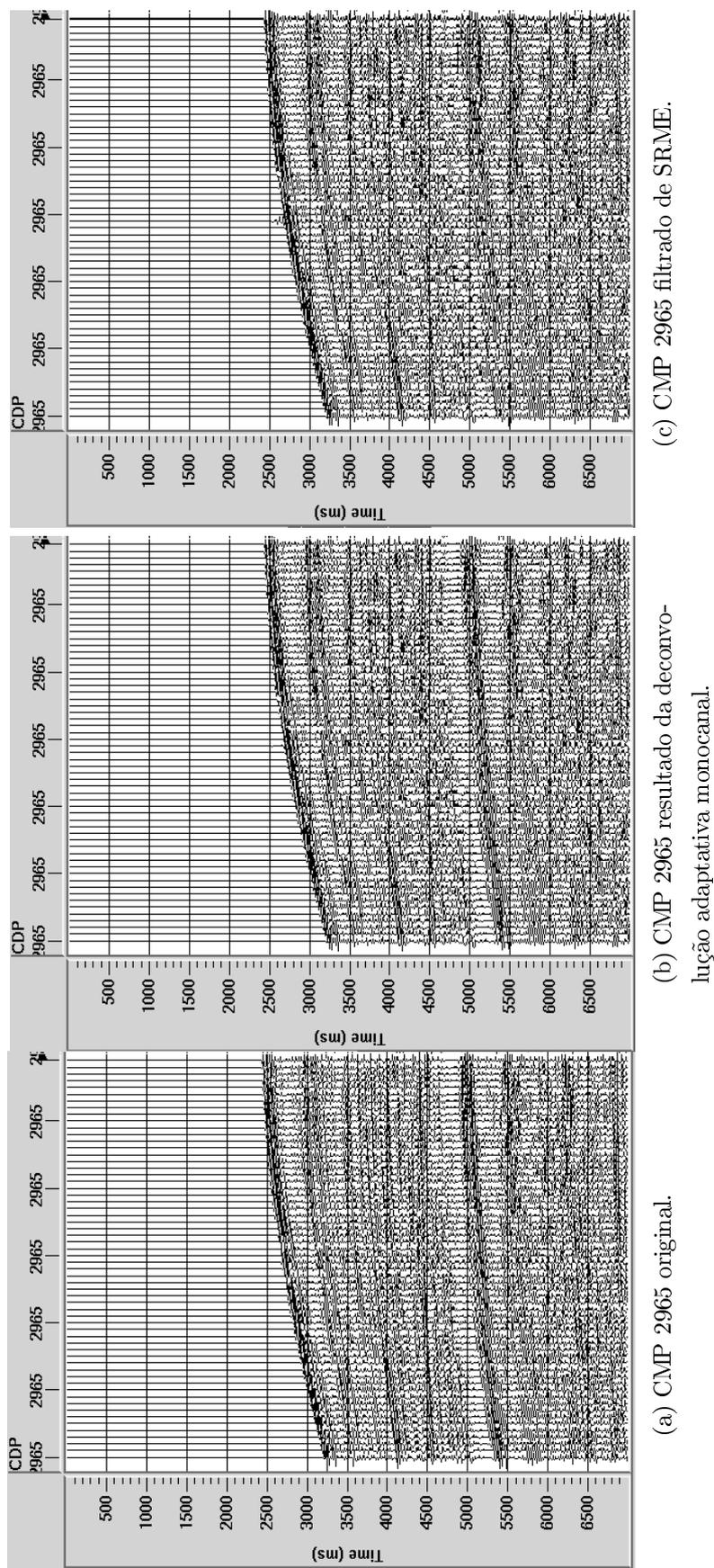
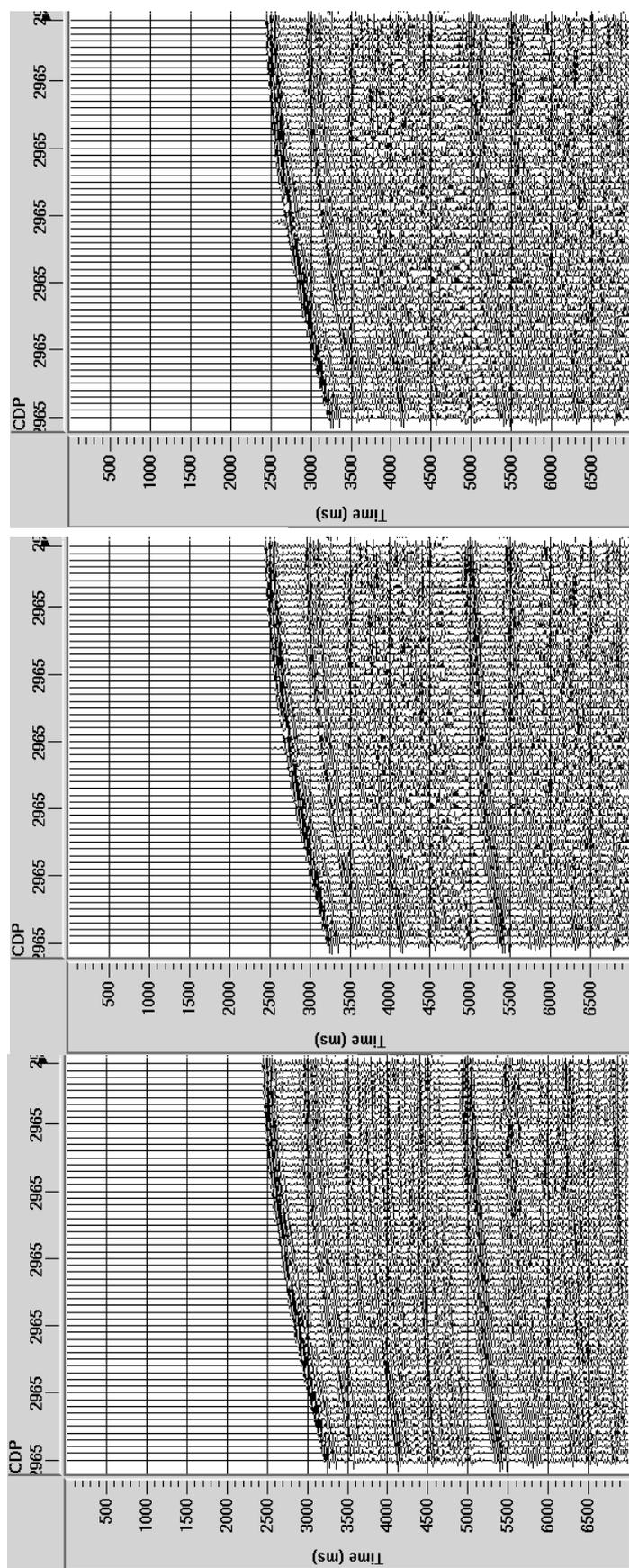


Figura 3.19: Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução adaptativa monocanal.



(a) CMP 2965 original.

(b) CMP 2965 resultado da deconvolução com norma L_p .

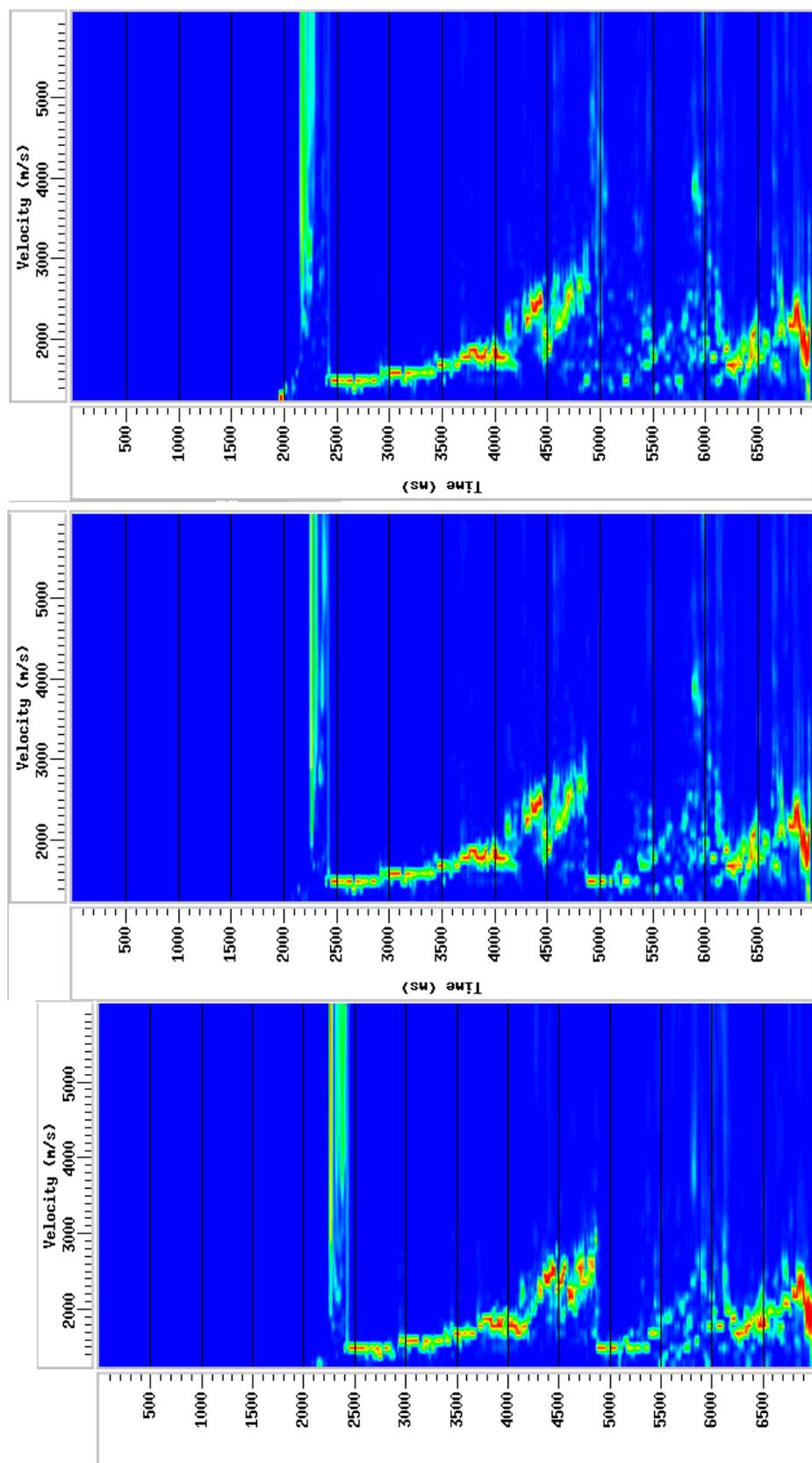
(c) CMP 2965 filtrado de SRME.

Figura 3.20: Resultado do método SRME para atenuação de múltiplas utilizando a deconvolução com norma L_p

3.3 Influência das filtragens no espectro de velocidades

A etapa de análise de velocidade possibilita a construção de um campo de velocidades que será crucial para a etapa de empilhamento, pois este campo busca encontrar os valores de velocidade que melhor horizontalizam as reflexões quando aplicada a correção *Normal Moveout* (NMO). A escolha dos pontos, ou *picks* de maior coerência que ocorrem ao longo da trajetória hiperbólica da reflexão em subsuperfície é feita nos painéis *semblances* onde o dado sísmico estará organizado em famílias de ponto médio comum (CMP). Logo, se o espectro de velocidades apresentar poucos pontos de coerência para a escolha dos *picks*, que representam o valor da velocidade que corrige o dado de NMO, não será possível obter um bom resultado de uma seção empilhada. Para se realizar esta etapa no *Seispace*, foram gerados *supergathers* para aumentar a coerência dos refletores. Em seguida, os painéis de *semblances* foram gerados com o intuito de verificar a influência das técnicas de filtragem.

Partindo do conceito que os métodos de filtragem aplicados neste trabalho buscam aumentar a coerência dos refletores atenuando o ruído das múltiplas, é possível verificar que os painéis de *semblance* irão melhorar consideravelmente. Com objetivo de constatar o efeito positivo dos métodos de filtragem no espectro de velocidade, a análise de velocidade foi feita no *supergather* do CMP 2975, antes de realizar qualquer filtragem e após cada uma delas (Figuras 3.21, 3.22, 3.23, 3.24). Sendo assim, o campo de velocidades gerado a partir do dado filtrado representa melhor os valores de velocidade de subsuperfície e conseqüentemente refletirá na qualidade da seção sísmica empilhada.



(a) Espectro de velocidade original do dado bruto.

(b) Espectro de velocidade após a deconvolução no PROMAX.

(c) Espectro de velocidade após a filtragem SRME.

Figura 3.21: Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução no PROMAX e da filtragem SRME.

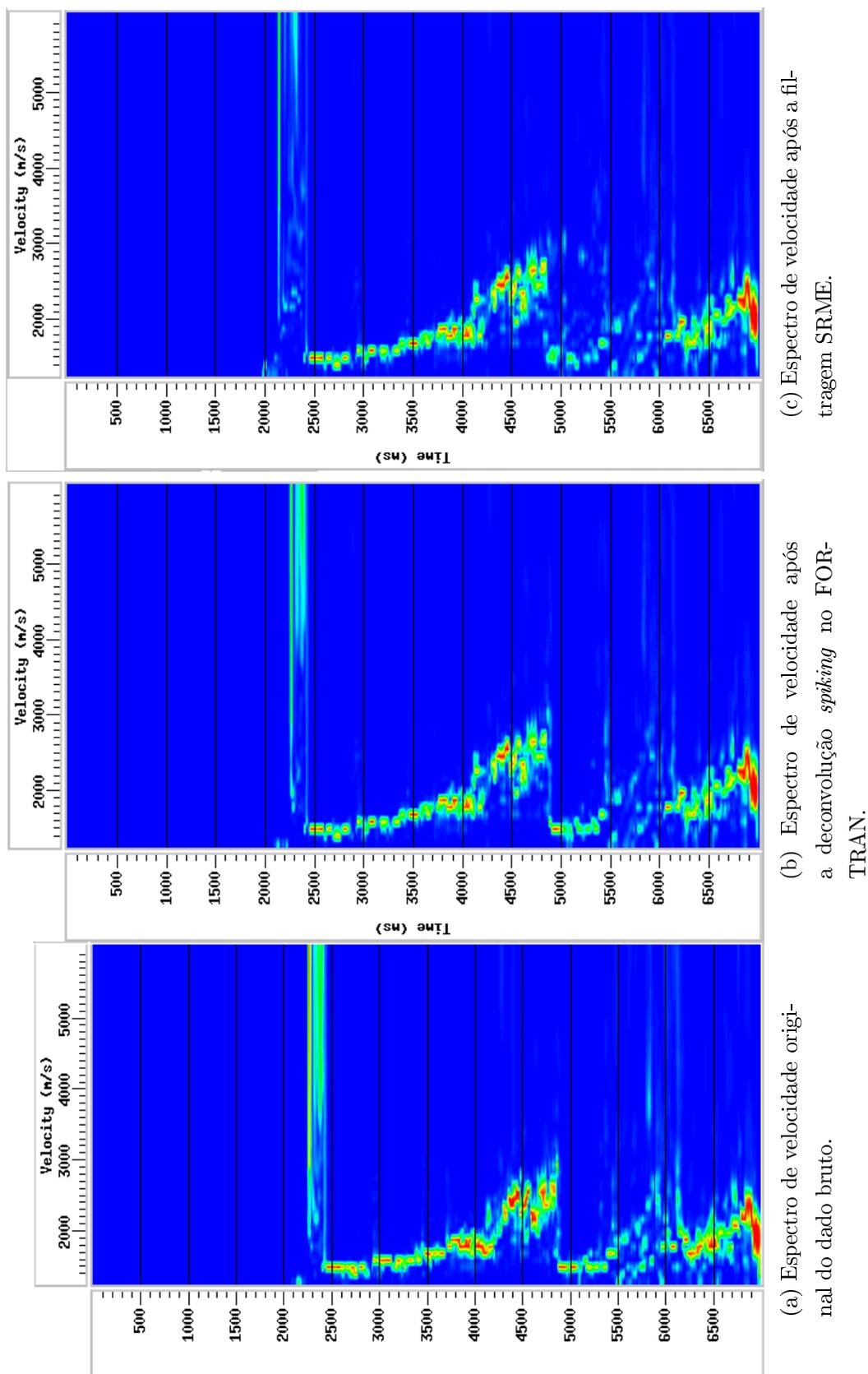
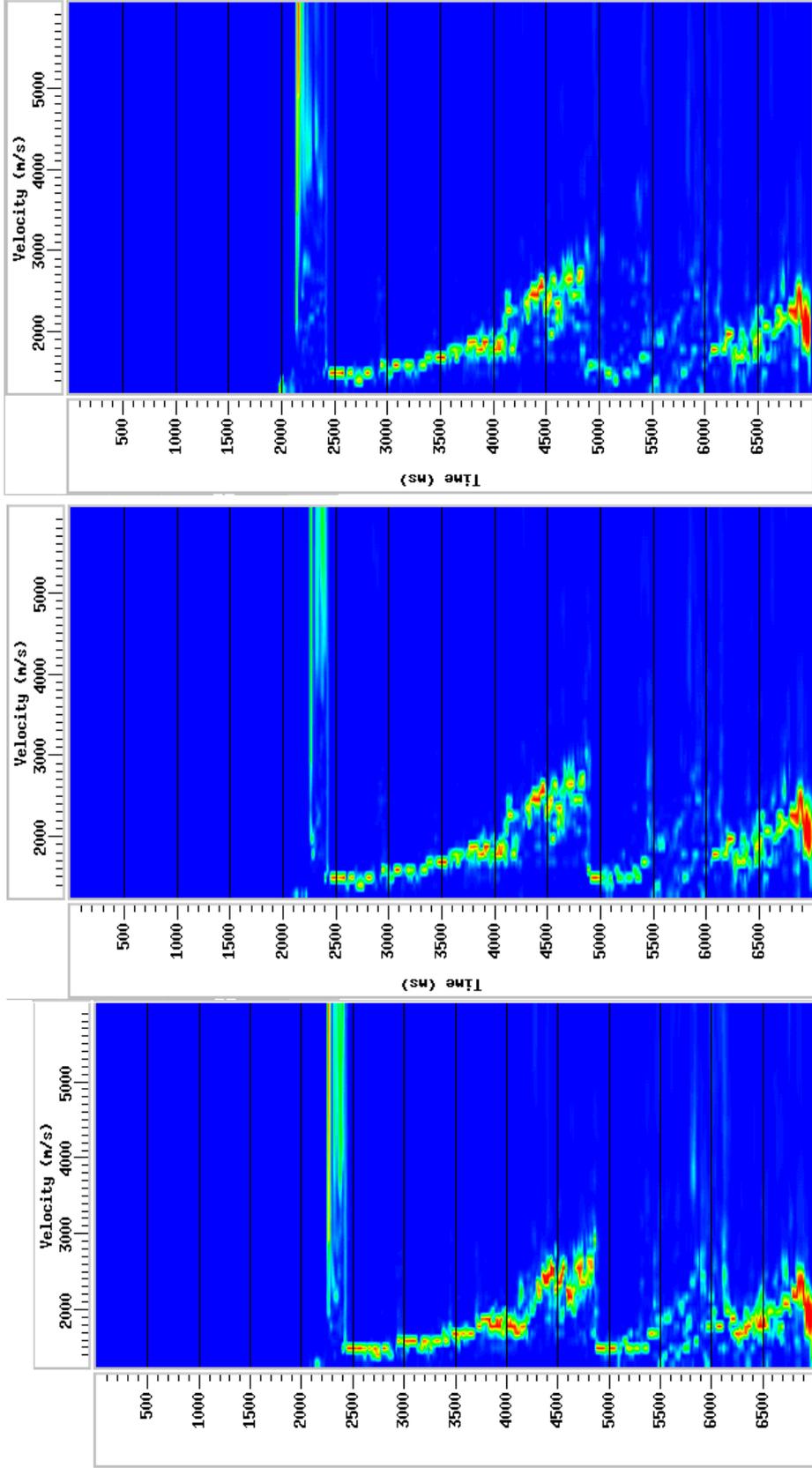
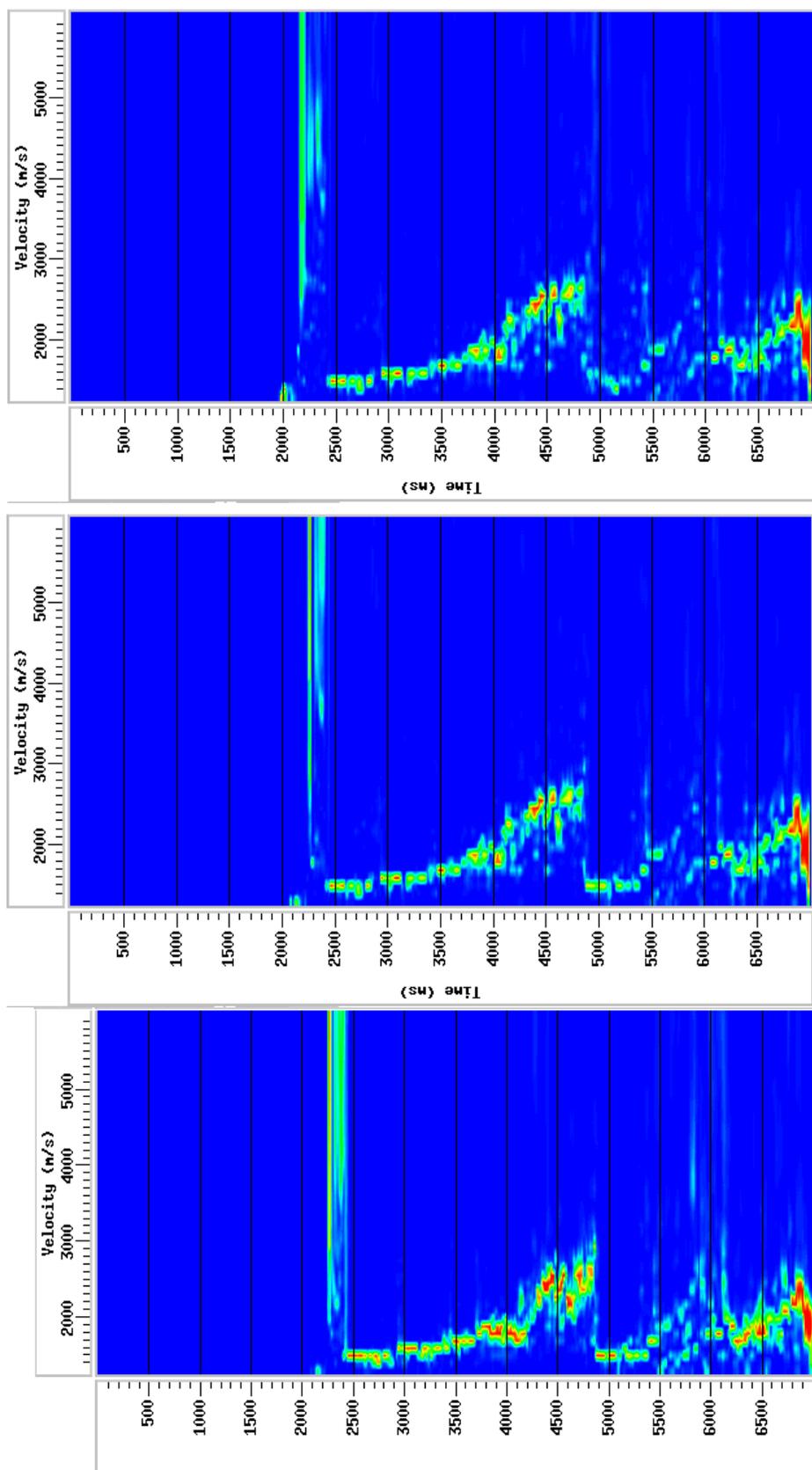


Figura 3.22: Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução *spiking* no FORTRAN e da filtragem SRME.



(a) Espectro de velocidade original do dado bruto. (b) Espectro de velocidade após a deconvolução adaptativa. (c) Espectro de velocidade após a filtragem SRME.

Figura 3.23: Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução adaptativa e da filtragem SRME.



(a) Espectro de velocidade original do dado bruto.
 (b) Espectro de velocidade após a deconvolução com norma L_p .
 (c) Espectro de velocidade após a filtragem SRME.

Figura 3.24: Resultado do espectro de velocidade após aplicação da deconvolução com norma L_p e da filtragem SRME.

3.4 Empilhamento

Os resultados finais obtidos nesse trabalho a partir do método de filtragem SRME associado as deconvoluções serão apresentados nessa seção. As seções foram geradas a partir da segunda análise de velocidade, utilizando como dado de entrada para essa análise o dado filtrado de SRME.

Inicialmente fez-se o processamento do dado original ou dado bruto, sem que nenhum método de filtragem fosse aplicado, como resultado temos a figura 3.25 que servirá como efeito de comparação dos efeitos e melhorias após a aplicação do SRME associado as deconvoluções.

A Figura 3.26 mostra a seção sísmica empilhada e deconvolvida pelo PROMAX após a filtragem SRME. Observa-se que o método de deconvolução não atuou muito bem na compressão do pulso e, devido a este fator, é possível constatar a existência de resquícios da múltipla de superfície livre.

As Figuras 3.27, 3.28, 3.29 representam seções sísmicas empilhadas com resultados satisfatórios para aplicação da filtragem SRME. As deconvoluções aplicadas pela linguagem FORTRAN.90 apresentaram melhores resultados que a deconvolução desenvolvida pelo *software Seispace*. Sendo que, dentre as deconvoluções realizadas no FORTRAN.90, a que melhor apresentou resultados para aplicação do SRME, foi a deconvolução utilizando norma L_p , entretanto, só é possível observar diferenças entre essas deconvoluções através de um alto grau de detalhes.

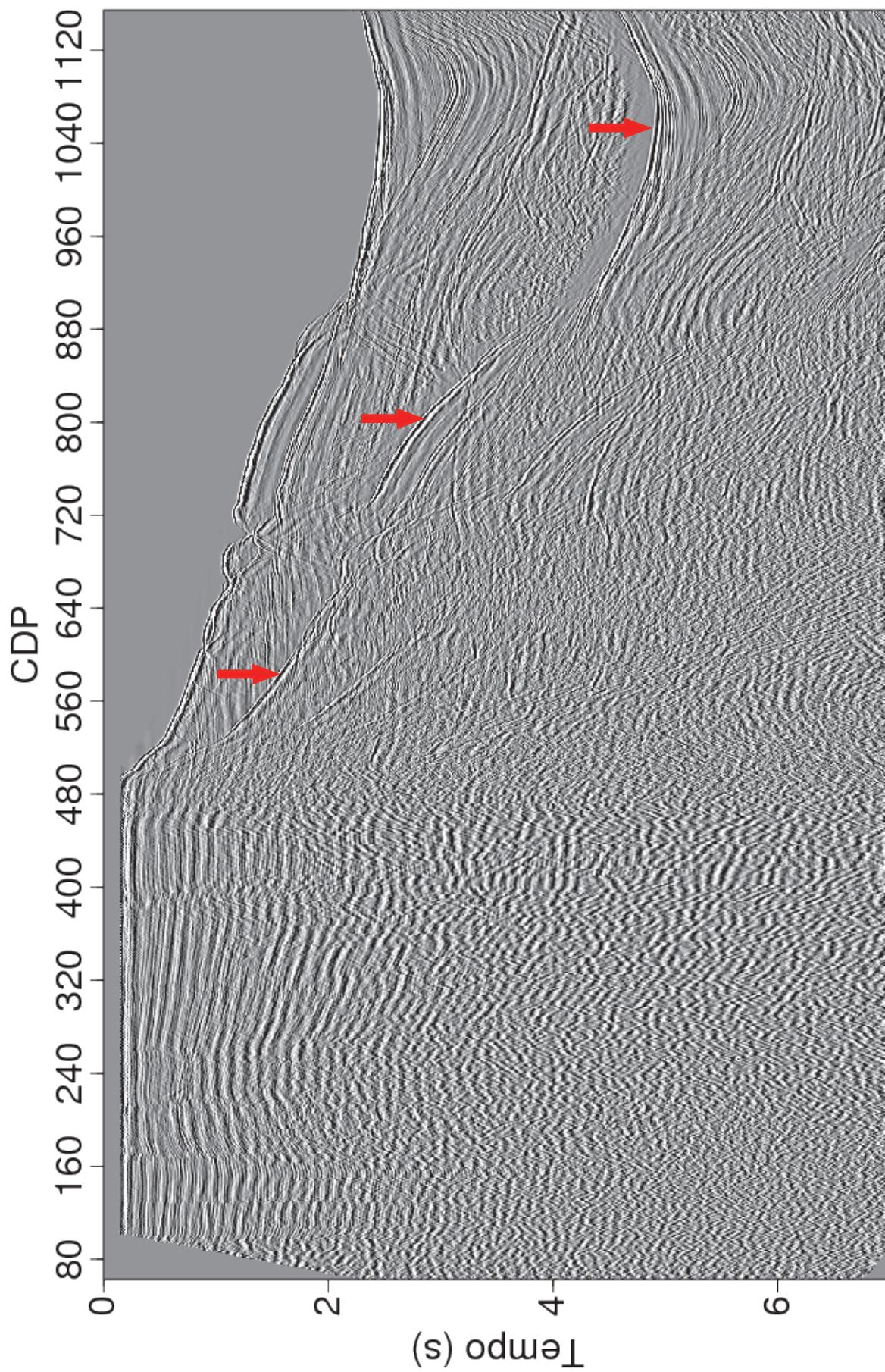


Figura 3.25: Seção sísmica bruta empilhada utilizando a velocidade da múltipla de superfície livre.

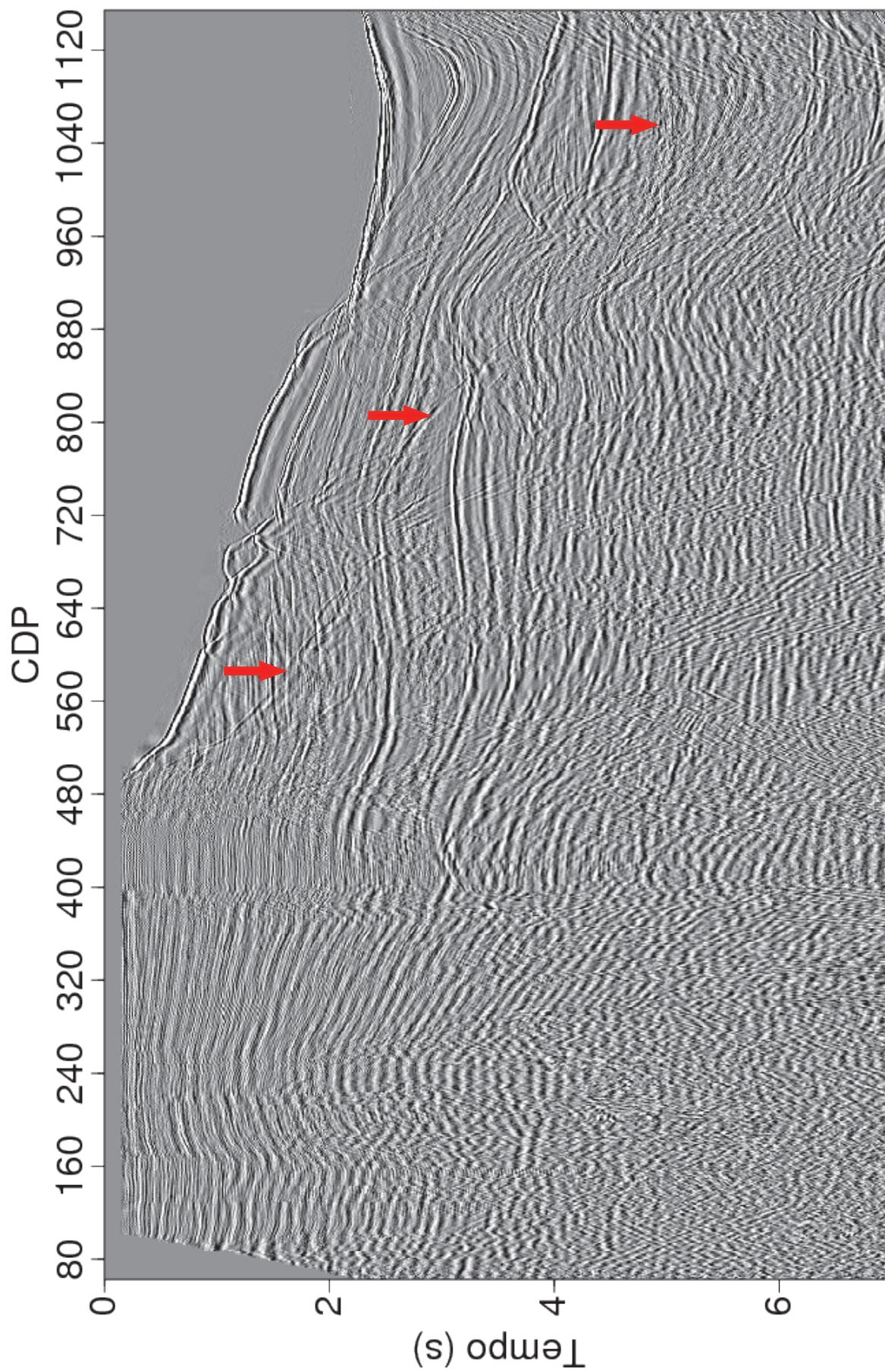


Figura 3.26: Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida pelo PROMAX e filtrada de SRME.

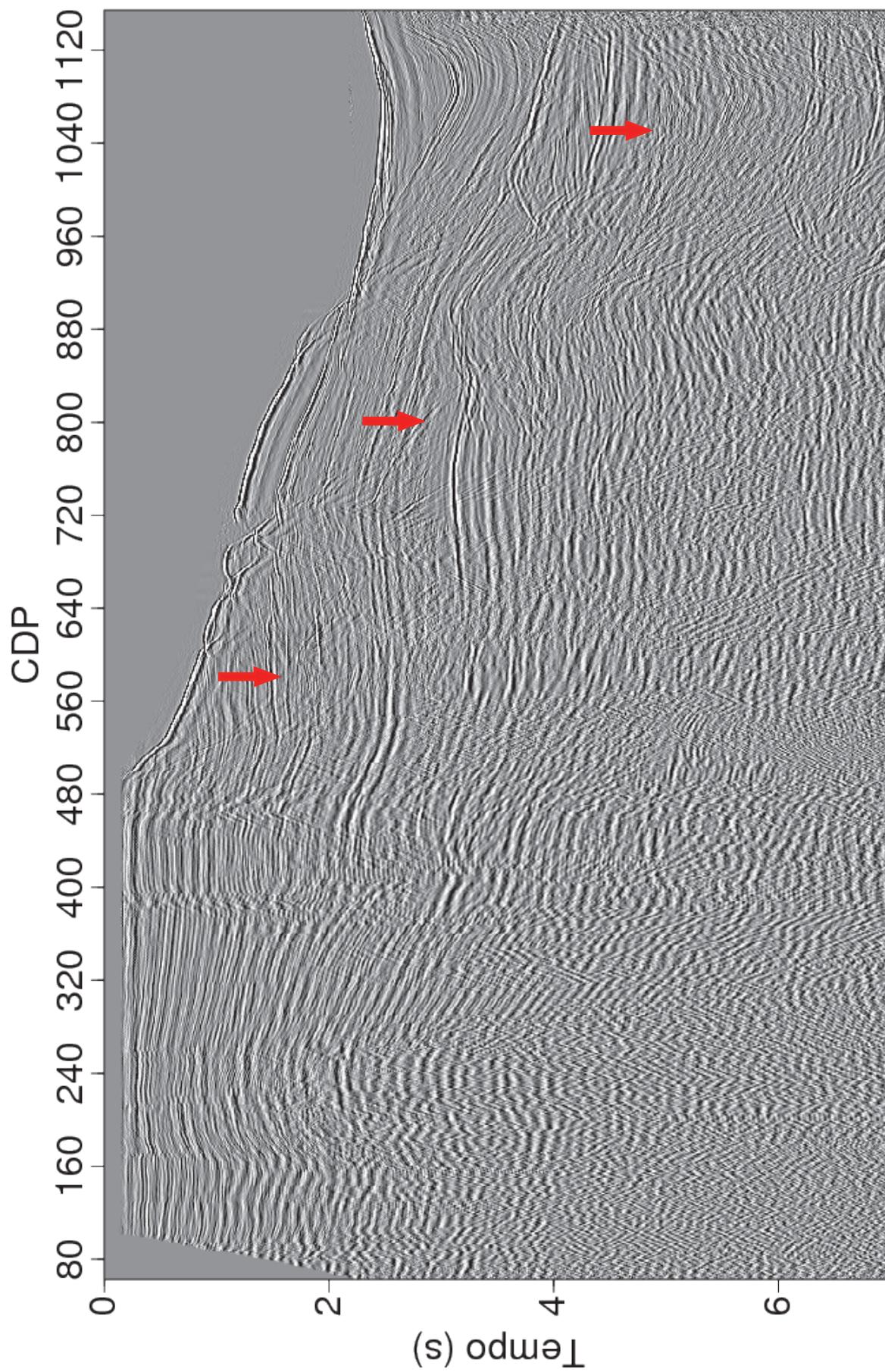


Figura 3-27: Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida utilizando a deconvolução *spiking* no FORTRAN e filtrada de SRME.

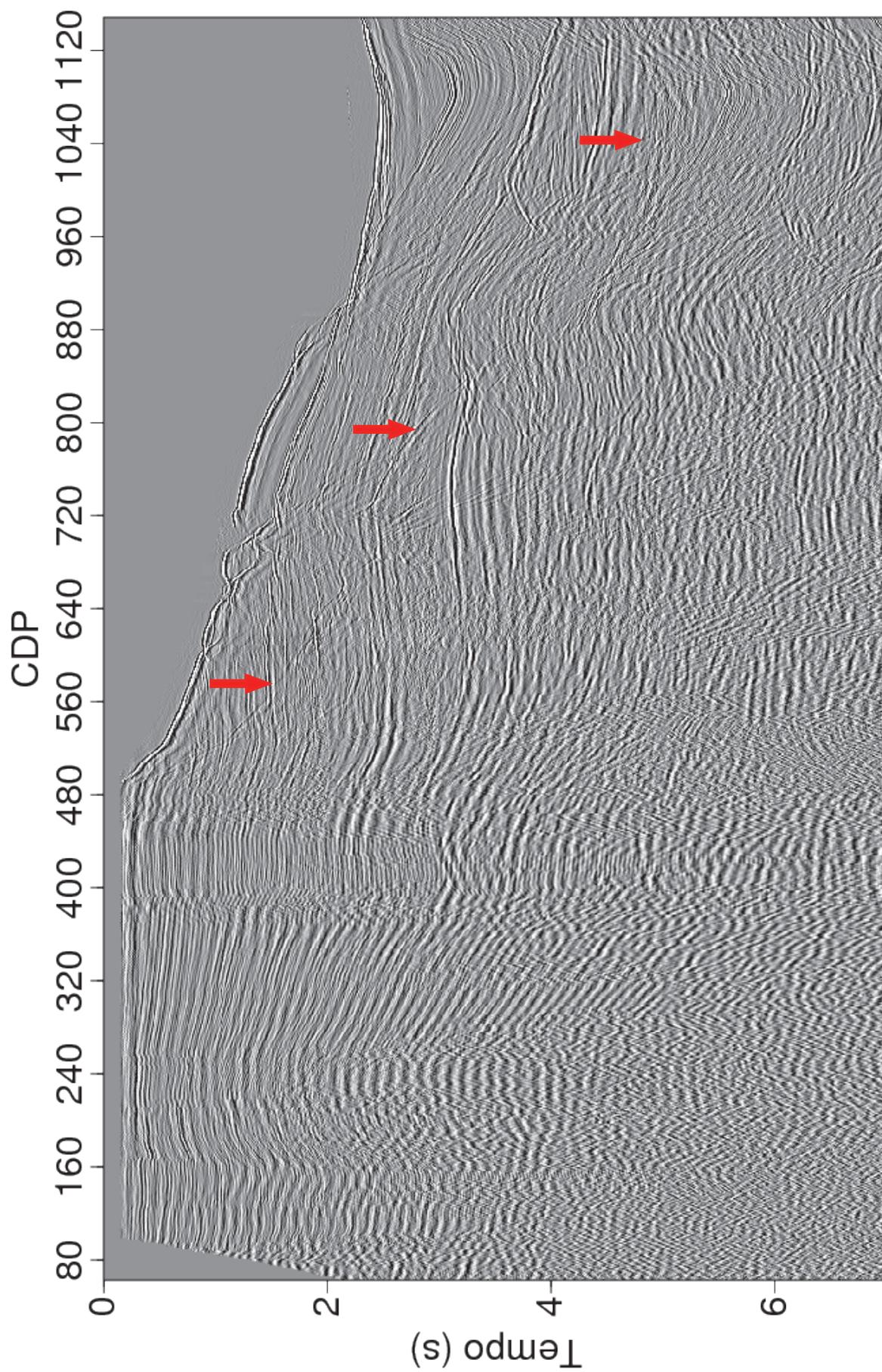


Figura 3.28: Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida utilizando a deconvolução adaptativa no FORTRAN e filtrada de SRME.

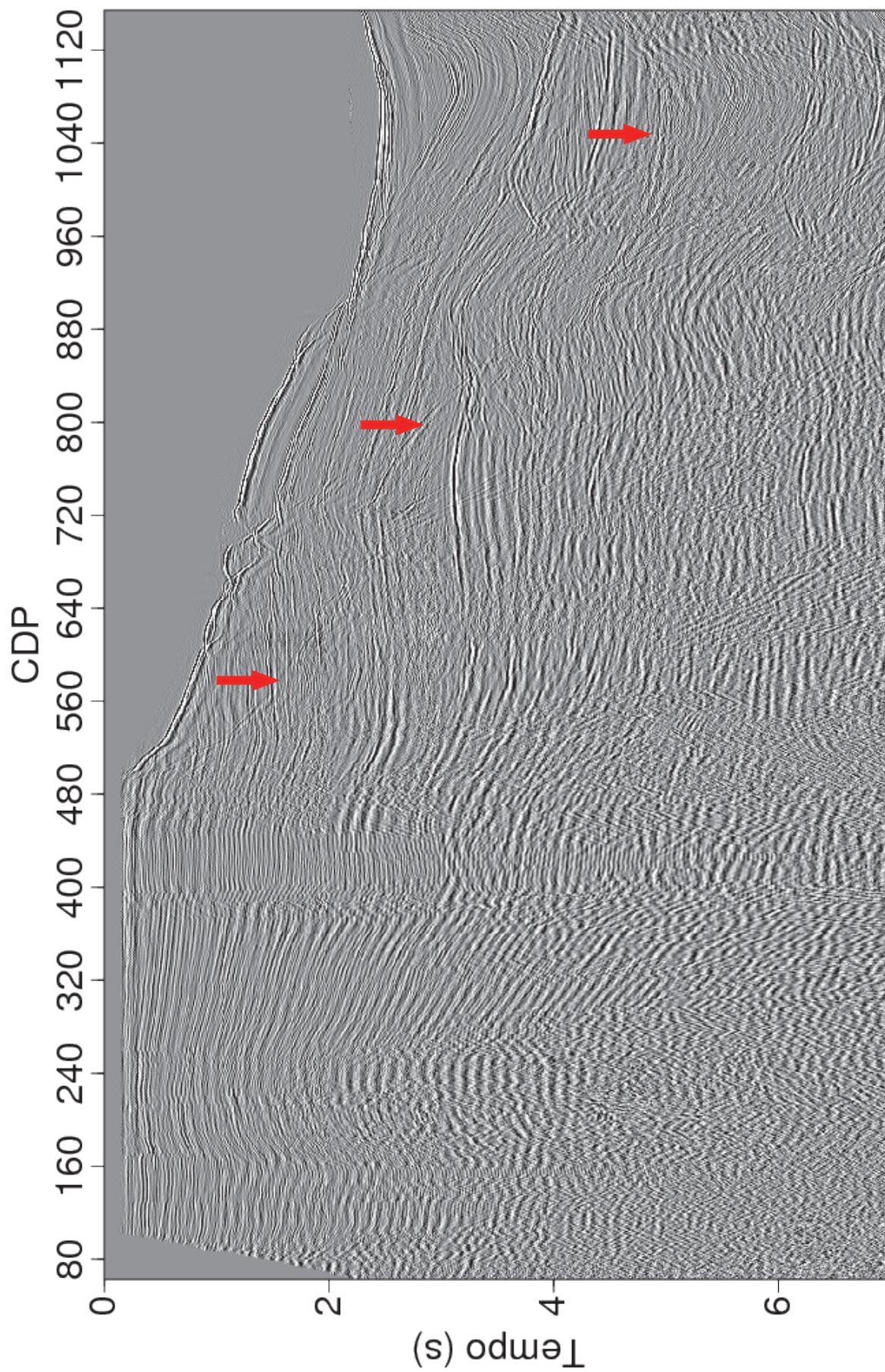


Figura 3.29: Seção sísmica empilhada utilizando a velocidade final, deconvolvida utilizando a deconvolução com norma L_p no FOR-TRAN e filtrada de SRME.

Capítulo 4

Conclusões

O objetivo do trabalho durante todas as etapas consistiu em melhorar a resolução das estruturas geológicas nas seções sísmicas empilhadas finais. A melhora na resolução é medida através da razão sinal-ruído antes e após as filtragens aplicadas. Para a obtenção de um modelo próximo da realidade em subsuperfície é necessário o controle dos parâmetros para aplicação das filtragem, de modo que a atenuação não seja nem muito suave, onde resquícios de ruídos ainda existirão, nem muito exagerada, pois dessa maneira é provável que informações importantes sejam perdidas no processo.

A atenuação das múltiplas de superfície na linha 2140266 da Bacia de Jequitinhonha utilizando o método de filtragem SRME associado as deconvoluções foi satisfatória. As deconvoluções utilizadas funcionaram como dados de entrada para aplicação do SRME, pois de acordo com a teoria desse método, para a predição da múltipla de superfície, o pulso deve ser considerado unitário. Dessa maneira, atendendo-se ao pré-requisito do SRME o dado foi melhor atenuado.

A deconvolução *spike* desenvolvida pelo PROMAX não obteve bons resultados quando comparada com as outras deconvoluções. A deconvolução *spike* realizada pela linguagem FORTRAN.90 apresentou bons resultados na compressão do pulso, assim como a deconvolução adaptativa e a deconvolução utilizando norma L_p . A deconvolução adaptativa não apresentou bons resultados quando utilizada para o caso monocanal, isso ocorreu devido a problemas na correlação lateral.

Nas seções empilhadas finais, as seções deconvolidas apresentaram resultados muito parecidos, com exceção da deconvolução realizada pelo *SeisSPACE*. Entretanto, fazendo uma análise mais detalhada, é possível observar que a deconvolução utilizando norma L_p apresentou-se como melhor resultado tanto na compressão do pulso quanto na filtragem SRME.

Devido a complexidade geológica do local há complicações para atenuar as múltiplas de superfície da região de plataforma rasa. Porém a combinação dos dois métodos (deconvolução

e SRME) mostrou-se eficiente para a atenuação das múltiplas de superfície da lâmina de água profunda.

Agradecimentos

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que me deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhora tudo o que tenho produzido na vida.

À pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais viva de verdade. Obrigada pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre.

Aos meus cães e companheiras Kenzi e Pan, fiéis e estabanadas, que sempre me ouviram e estavam dispostas a longas corridas em momentos de alívio de stress do trabalho.

Em especial aos professores: Porsani; Marcos; Michelangelo; Sato; Mariana; Botelho;

Em especial aos estudantes: Leonardo; Wilker; Manenti; Rodrigo; Jefferson; Victor;

Referências

- Alves, F. D. M. (2013) Atenuação do ground roll utilizando filtragem adaptativa e antissimétrica tipo Wiener-Levinson e decomposição em modos empíricos., Trabalho de Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Anstey, N. A. (1966) The sectional auto-correlogram and the sectional retro-correlogram, *Geophysical Prospecting*, **14**(4):389–426.
- Berkhout, A. J. (2012) Seismic migration: Imaging of acoustic energy by wave field extrapolation, vol. 12, Elsevier.
- Clarke, G. K. (1968) Time-varying deconvolution filters, *Geophysics*, **33**(6):936–944.
- Cohen, J. e Stockwell, J. (1997) CWP-SU: Seismic Unix release 30, Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines, Colorado.
- Griffiths, L.; Smolka, F. e Trembly, L. (1977) Adaptive deconvolution: A new technique for processing time-varying seismic data, *Geophysics*, **42**(4):742–759.
- Kearey, P. e Brooks, M. (1991) An introduction to geophysical prospecting, Blackwell, Boston, p. 254.
- Ledesma, D. C. (2011) Deconvolução de dados sísmicos de reflexão utilizando mudança de fase do filtro de Wiener-Levinson, Trabalho de Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Lima, R. R. e Porsani, M. J. (2013) Atenuação do ground-roll utilizando filtragem adaptativa svd no domínio da frequência, In: *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013*, pp. 1488–1493, Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society.
- Melo, P. E. M. e Porsani, M. J. (2001) Deconvolução iterativa de dados sísmicos com norma L_p , In: *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, SBGf, Salvador*.
- Mohriak, W. U. (2003) Bacias sedimentares da margem continental brasileira, *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*, L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CPRM, Brasília, 2003, **3**:87e165.

- Montenegro, J. B. e Porsani, M. (1995) Deconvolução adaptativa da assinatura da fonte utilizando um algoritmo tipo Levinson para janelas de tempo, In: *4th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, SBGf, Rio de Janeiro*.
- Oliveira, S. L.; Maciel, R. C.; da Silva, M. G. e Porsani, M. J. (2014) Attenuation of short-period multiples in seismic data processing of the Jequitinhonha Basin, Brazil, *Revista Brasileira de Geofísica*, **32**(3):395–403.
- Popini, M. V.; Porsani, M. J. e Porsani, J. L. (2001) Processamento de dados gpr utilizando métodos da sísmica de reflexão, In: *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, SBGf, Salvador*.
- Porsani, M. J.; Niwas, S. e Ferreira, N. R. (2001) Robust inversion of vertical electrical sounding data using a multiple reweighted least-squares method, *Geophysical prospecting*, **49**(2):255–264.
- Robinson, E. e Treitel, S. (1980) *Geophysical signal analysis*: Pren Tice-Hall, Englewood Cliffs.
- Robinson, E. A. e Treitel, S. (2000) *Geophysical signal analysis*, Tulsa, OK, Society of Exploration Geophysicists.
- Santos, C.; Gontijo, R.; Araújo, M. e Feijó, F. (1994) Bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha, *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, **8**(1):185–190.
- Santos Jr, A. (2002) Deconvolução multicanal utilizando um algoritmo tipo Wiener-Levinson, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Silva, M. G. d. (2004) Processamento de dados sísmicos da Bacia do Tacutu, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Verschuur, D. J. (2006) *Seismic multiple removal techniques: Past, present and future*, EAGE Publications, Netherlands.
- Wang, R. (1977) Adaptive predictive deconvolution of seismic data, *Geophysical Prospecting*, **25**(2):342–381.
- Yilmaz, O. (1987) *Seismic data processing* Society of Exploration Geophysicists Tulsa, OK Google Scholar.
- Yilmaz, Ö. e Doherty, S. (2001) *Seismic data analysis*: Society of Exploration Geophysicists Tulsa.