



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

APLICAÇÃO DA DECONVOLUÇÃO
ADAPTATIVA WIENER-LEVINSON E
FILTRAGEM SVD EM DADOS SÍSMICOS
DA BACIA DE TACUTU.

MILENA FERNANDES XAVIER DOS SANTOS

SALVADOR – BAHIA

JUNHO – 2016

**Aplicação da Deconvolução Adaptativa Wiener-Levinson e Filtragem SVD em
Dados Sísmicos da Bacia de Tacutu.**

por

MILENA FERNANDES XAVIER DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

_____ Dr. Milton José Porsani

_____ Dr. Oscar Fabian Mojica Ladino

_____ Dr. Michelangelo Gomes da Silva

Data da aprovação:

Aos meus pais por todo amor,
paciência e incentivo durante toda
essa jornada

RESUMO

O processamento de dados sísmicos constitui-se de um conjunto de etapas afim de melhorar a qualidade do dado original e como consequência obter uma seção sísmica com maior resolução das estruturas em subsuperfície. Entre os muitos obstáculos enfrentados durante o processamento de dados terrestres, a presença do *ground-roll* representa um dos principais e mais frequentes problemas.

Nas últimas décadas, várias técnicas tem sido desenvolvidas e testadas afim de atenuar o *ground-roll*, sem perdas do sinal sísmico de interesse. Diante disso, esse trabalho visa aplicar e comparar algumas dessas técnicas, sendo elas: Filtragem SVD (*Singular Value Decomposition*) no domínio tempo, Filtragem SVD no domínio frequência (SVD_{df}) e Deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson aplicada no domínio da frequência. Os testes de eficácia foram realizados em uma linha sísmica da Bacia da Tacutu, localizada no estado de Roraima, na qual a presença do ruído é marcante.

A filtragem SVD tanto no domínio tx quanto no domínio fx são realizados a partir de um subconjunto de dados sísmicos que geram o espectro SVD, no qual as primeiras autoimagens estão associadas aos eventos correlacionáveis, ou seja as reflexões. A grande diferença está no fato da filtragem SVD no domínio fx atuar na banda de frequência média na qual o *ground-roll* se manifesta, o espectro SVD gerado contém as frequências na região do *ground-roll*. Portanto, o método SVD_{df} atenua o *ground-roll* através da diferença entre o espectro original e o espectro SVD.

Na deconvolução no domínio da frequência, o dado também é passado para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier 1D assim como na filtragem SVD_{df} . Consequentemente, os eventos no sismograma têm suas formas afetadas, o *ground-roll* passar a ser apresentado nos valores de baixas frequências, enquanto que as reflexões de interesse são mantidas e dessa forma a deconvolução é utilizada para atenuar o *ground-roll* ao longo dos afastamentos.

Os resultados obtidos apresentam a eficiência ou não desses métodos na linha sísmica utilizada. De maneira geral os métodos no domínio da frequência conseguiram atenuar o *ground-roll* mas criaram muitos ruídos aleatórios que foram associados a mudança de domínio, atrelado a baixa razão sinal/ruído do dado. O uso combinado dos métodos de deconvolução WL com a filtragem SVD no domínio do tempo apresentou o melhor resultado em relação a qualidade da seção sísmica empilhada.

ABSTRACT

The seismic data processing consists of a set of processes intending to improve the quality of the original data, consequently it provides a seismic section with higher resolution of the structures in the subsurface. Among the many obstacles faced during the terrestrial seismic data processing, the presence of ground-roll noise is one of the most frequent problems.

During the last decades, several geophysical techniques have been developed and tested to suppress coherent terrestrial noises. Therefore, this work aims to apply and compare some of these methods, which are: SVD (Singular Value Decomposition) Filtering in time domain, SVD Filtering in frequency domain and Wiener-Levinson adaptive Deconvolution in frequency domain. The efficacy trials were performed in a seismic line of Tacutu Basin, located in the state of Roraima, Brasil, wherein the presence of noise is clearly notable.

Both SVD filtering in time and frequency domain are performed from a subset of seismic data to generate the SVD spectrum, in which the first(s) eigenimage(s) represents the correlated events, i.e the reflections. The difference between these SVD methods is that SVD filtering in frequency approach is performed on a small number of seismic traces at the same band of frequency of the noise. Therefore, this method attenuates the ground-roll through the difference between the original spectrum and SVD spectrum.

In deconvolution applied in frequency domain, the data is also passed to the frequency using fast 1D Fourier transform, as well as SVD filtering in fx domain. Consequently, the shape of the events in the seismogram are affected, the ground-roll is now displayed randomly at low frequency values, while the reflections of interest are maintained. Thus, deconvolution is used to attenuate the noise along the offsets.

The results display the effectiveness or not of all these methods applied in the Tacutu's seismic line. In general, the techniques applied in frequency domain were able to suppress the ground-roll noise, although some random noises were created associated with changing domains, linked to low level of signal/noise ratio. Finally, the combined use of WL deconvolution and SVD filtering in time domain, presented the best result concerning the quality of stacked seismic section.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | iv |
| ÍNDICE | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vii |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 1 O PROCESSAMENTO SÍSMICO | 3 |
| 1.1 Fluxograma de Processamento | 3 |
| 1.2 Pré Processamento | 4 |
| 1.2.1 Geometria | 4 |
| 1.2.2 Correção de Amplitudes | 6 |
| 1.2.3 Edição e Mute | 6 |
| 1.3 Processamento Avançado | 6 |
| 1.3.1 Filtragem | 7 |
| 1.3.2 Deconvolução | 8 |
| 1.3.3 Análise de Velocidades | 9 |
| 1.3.4 Correção NMO | 10 |
| 1.3.5 Empilhamento | 12 |
| CAPÍTULO 2 METODOLOGIA | 13 |
| 2.1 A Transformada de Fourier | 13 |
| 2.2 Filtragem no Domínio da Frequência | 17 |
| 2.3 Deconvolução de Dados Sísmicos | 20 |
| 2.3.1 O Modelo Convolutional do Traço Sísmico | 20 |
| 2.3.2 A Deconvolução Preditiva de Wiener-Levinson | 22 |
| 2.3.3 Filtro Inverso de Wiener-Levinson | 23 |
| 2.3.4 Deconvolução na Forma Adaptativa | 24 |
| 2.3.5 O Método de Deconvolução no Domínio da Frequência | 25 |
| 2.4 Filtragem SVD | 27 |
| 2.4.1 Matrizes de Covariância | 27 |
| 2.4.2 Autovalores e Autovetores | 28 |
| 2.4.3 Decomposição em Valores Singulares SVD | 28 |

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 2.4.4 | Filtragem SVD no Domínio do Tempo | 29 |
| 2.4.5 | Filtragem SVD no Domínio da Frequência | 32 |
| 2.4.6 | Etapas do Algoritmo SVD_{Df} | 33 |
| CAPÍTULO 3 | Resultados | 34 |
| 3.1 | Fluxograma Adotado | 35 |
| 3.2 | Comparação de Dados | 37 |
| 3.3 | Espectro de Amplitudes | 42 |
| 3.4 | Influência das Filtragens no Espectro de Velocidades | 44 |
| 3.5 | Seções Empilhadas | 48 |
| CAPÍTULO 4 | CONCLUSÃO | 54 |
| | Referências Bibliográficas | 56 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Parâmetros da geometria. Os triângulos representam os geofones e a estrela representa a fonte sísmica. | 5 |
| 1.2 | Mecanismo de propagação da onda superficial Rayleigh. | 7 |
| 1.3 | Tiro contaminado pelo ground-roll. | 8 |
| 1.4 | Espectro de velocidades ilustrativa de uma família CMP da linha sísmica da Bacia do Tacutu. | 10 |
| 1.5 | Geometria para uma onda refletida numa única camada horizontal.O ponto M correspondente ao ponto médio entre a fonte S o receptor R. Adaptado de Danilo Cruz(2014). | 11 |
| 2.1 | (a) traço original no domínio do tempo; (b) traço passado pro domínio da frequência, note o espelhamento na frequência equivalente a 125 Hz; (c) traço no domínio da frequência após o processo de deconvolução; (d) traço ainda espelhamento no domínio do tempo; (e) traço passado de volta pro domínio do tempo e deconvolvido (Ferreira,(2010)). | 19 |
| 2.2 | Modelo Convolutacional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (Brooks,2009). | 21 |
| 2.3 | O processo de deconvolução adaptativa | 25 |
| 3.1 | Fluxograma de processamento adotado. | 36 |
| 3.2 | Filtragem SVD no domínio do tempo do tiro 334. Dados do tiro original corrigido de NMO em (a), Dados do tiro filtrado com SVD no domínio do tempo em (b). | 38 |
| 3.3 | Filtragem SVD no domínio da frequência do tiro 334. Dados do tiro original em (a), Dados do tiro filtrado com SVD no domínio da frequência em (b). | 39 |
| 3.4 | Deconvolução no domínio da frequência do tiro 334. Dados do tiro original em (a), Dados do tiro filtrado com deconvolução no domínio da frequência em (b). | 40 |
| 3.5 | Dados do tiro 334 original corrigido de NMO em (a), Dados do tiro após aplicação da deconvolução e filtragem SVD no domínio do tempo em (b). | 41 |
| 3.6 | Comparação dos espectro de amplitudes do tiro 334 original e após aplicação das filtragens SVD no domínio do tempo e deconvolução + filtragem SVD. | 43 |
| 3.7 | Comparação dos espectro de amplitudes do tiro 334 original e após aplicação das filtragens SVD e deconvolução ambas no domínio da frequência. | 43 |
| 3.8 | Espectro de velocidades do dado original. | 45 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.9 | Espectro de velocidades do dado filtrado com SVD no domínio do tempo . . . | 45 |
| 3.10 | Espectro de velocidades do dado filtrado com SVD no domínio da frequência | 46 |
| 3.11 | Espectro de velocidades do dado filtrado com Deconvolução no domínio da frequência | 46 |
| 3.12 | Espectro de velocidades do dado filtrado com SVD e deconvolução WL no domínio do tempo | 47 |
| 3.13 | Linha sísmica original empilhada. | 49 |
| 3.14 | Linha sísmica empilhada após aplicar filtragem SVD no domínio do tempo. . | 50 |
| 3.15 | Linha sísmica empilhada após a aplicação da filtragem SVD no domínio da frequência. | 51 |
| 3.16 | Linha sísmica empilhada após a aplicação da deconvolução no domínio da frequência. | 52 |
| 3.17 | Linha sísmica empilhada após a aplicação da deconvolução WL e filtragem SVD no domínio do tempo. | 53 |

INTRODUÇÃO

A exploração de óleo e gás requer o uso de técnicas que consigam imagear as camadas sedimentares a grandes profundidades nas bacias geológicas, afim de mapear as estruturas, nas quais os hidrocarbonetos estejam presentes. Tendo em vista esse objetivo, o método geofísico mais utilizado e difundido é a sísmica de reflexão, o qual consiste na transmissão de uma onda acústica no subsolo afim de medir a energia refletida devido ao contraste de impedância associado as diferentes litologias em subsuperfície.

O processamento sísmico é de fundamental importância no tratamento dos resultados de uma aquisição sísmica. Uma vez que, mesmo adotando procedimentos básicos durante a aquisição de dados para diminuir a contaminação dos mesmos com ruídos, é inevitável que os dados apresentem alguns tipos de ruídos associados a própria física envolvida na aquisição. Portanto, é responsabilidade do geofísico encarregado de processar os dados, definir o fluxograma de processamento e aplicar filtragens e correções afim de melhorar a qualidade do dado, minimizando os erros e conseqüentemente facilitando a visualização das estruturas geológicas com interesse econômico associado.

O fluxograma de processamento adotado pelo geofísico pode variar muito de acordo principalmente com: o dado original, a disponibilidade de softwares e tempo. No entanto, um fluxograma padrão consiste de duas etapas: o pré processamento - preparação do dado sísmico; e o processamento avançado, que consiste na aplicação de técnicas voltadas a melhoria da resolução e da razão sinal/ruído. A preparação de ruídos, que nada mais é do que sinais captados pelos receptores que não constituem as reflexões de interesse, é o que mais prejudica o sucesso do processamento sísmico.

O *ground-roll* é um dos principais tipos de ruído presentes em dados sísmicos. Esse ruído está associado a propagação de ondas superficiais *Rayleigh*, tratando-se de um ruído coerente tendo como características as altas amplitudes, baixas frequências e baixas velocidades. Propagando-se em meios não homogêneos eles tem carácter dispersivo, sendo assim o *ground-roll* mascara as reflexões no sismograma (Alves, 2013).

Vários métodos de filtragem além dos convencionais (passa-banda e o f-k) vem sendo desenvolvidos e testados afim de eliminar ruídos dos sismogramas. Portanto, o objetivo desse trabalho é testar e comparar a eficiência de alguns métodos de atenuação do *ground-roll*, sendo esses: Filtragem SVD no domínio $t-x$, filtragem SVD no domínio $f-x$ e deconvolução adaptativa no domínio $f-x$ (Dantas,2014; Ladino,2011; Lima,2014). A aplicação dessas técnicas visa não somente a atenuação do *ground-roll*, como também a melhora da

razão sinal/ruído.

O técnica de decomposição em valores singulares proveniente da álgebra linear, é um método muito importante dentro do processamento de dados sísmicos como filtro bidimensional de coerência. A filtragem adaptativa SVD realiza a reconstituição do traço central dentro de um subconjunto de traços, sendo utilizada apenas as primeiras autoimagens, nas quais estão contidas as informações sobre os eventos correlacionáveis, ou seja, as reflexões de interesse. Esse método preserva a amplitude relativa e realça a continuidade e coerência dos eventos de reflexão e atenua o ruído que está associado às demais autoimagens que são descartadas (Ladino, 2011).

A filtragem SVD atuando no domínio da frequência pode ser aplicada a uma determinada faixa de frequência do dado, como a exemplo da faixa de frequência em que o ground-roll atua de 5-20 Hz. O resultado é característico daquela banda de frequências escolhidas, sendo assim a filtragem propriamente dita será a diferença entre o espectro original do dado e o espectro predito pelo SVD.

A deconvolução do dado sísmico é definido como uma das três etapas primárias do processamento sísmico (Yilmaz, 2001). Essa etapa tem como característica o aumento da resolução temporal do dado através da compressão do pulso sísmico, definindo melhor as reflexões. A recuperação da função refletividade é o objetivo do processo de deconvolução, uma vez que na função refletividade estão embutidas as características geológicas do meio. Uma nova aplicação da deconvolução está relacionada aplicabilidade da deconvolução adaptativa em dados terrestres com intuito de atenuar a contaminação desses dados com o ground-roll. Para isso, essa técnica se utiliza do filtro preditivo de Wiener-Levinson e recursão de Levinson, após o dado ser primeiramente levado para o domínio $f-x$ através da transformada 1D de Fourier.

A linha 204-RL-247 da Bacia de Tacutu, a qual está fortemente contaminada pelo ground-roll, foi utilizada afim de testar e comparar a eficiência dos métodos estudados. Inicialmente, os métodos foram aplicados separadamente afim de compará-los com o dado bruto, e posteriormente o resultado da filtragem SVD foi combinada com a deconvolução preditiva de Wiener-Levinson traço a traço, afim de verificar as vantagens e desvantagens da associação de métodos.

Por fim, esse trabalho está dividido em quatro capítulos: no primeiro, são abordados os aspectos teóricos do processamento sísmico de forma resumida, desde a geometria até o empilhamento; no segundo capítulo é apresentada a metodologia utilizada nesse trabalho assim como a descrição dos aspectos teóricos envolvidos nos métodos utilizados nesse trabalho; o terceiro capítulo apresenta os resultados obtidos durante esse trabalho, comparando as técnicas apresentadas nesse trabalho e apresentando a melhor solução para a linha processada; o quarto e último capítulo apresenta as conclusões obtidas nesse trabalho.

CAPÍTULO 1

O PROCESSAMENTO SÍSMICO

O processamento sísmico de dados de reflexão consiste basicamente no tratamento do sinal sísmico através de técnicas geofísicas, como as diversas técnicas de filtragem existentes afim de atenuar os ruídos associados a esse sinal sísmico, os quais são responsáveis por dificultar a visualização dos refletores na subsuperfície. Sendo assim, o objetivo principal do processamento sísmico é aumentar a razão sinal/ruído o que consecutivamente irá ajudar a mapear as verdadeiras posições das estruturas geológicas na subsuperfície.

O processamento pode ser dividido em duas etapas: o pré processamento e o processamento avançado, a primeira etapa consiste basicamente na preparação do dado sísmico, através da reorganização de acordo com o arranjo de aquisição utilizado em campo e os ruídos mais grosseiros são retirados, como por exemplo no caso de geofones defeituosos para que na segunda etapa sejam utilizadas técnicas e algoritmos matemáticos mais complexos com o intuito de obter uma imagem, também chamada de seção sísmica, de maior qualidade e resolução possível. Todas essas etapas do processamento constituem o que chamamos de fluxograma de processamento.

A quantidade de etapas dentro do fluxograma de processamento irá depender dentre muitos fatores, da qualidade do dado, dos objetivos do geofísico e também dos recursos disponíveis no software utilizado (Silva, 2004). A seção sísmica empilhada irá transparecer quão bom o fluxograma de processamento foi realizado, levando em consideração que alterações no sinal sísmico e a criação de artefatos numéricos devem ser fortemente evitados. Um processamento sísmico bem sucedido irá apenas ressaltar as informações que já estavam presentes no dado sísmico original, portanto a criação de dados é um erro grave.

1.1 Fluxograma de Processamento

As necessidades do geofísico e os recursos disponíveis nos softwares de processamento irão definir o fluxograma de processamento a ser adotado. No entanto, um fluxograma básico consiste das seguintes etapas:

| Processamento Sísmico | |
|------------------------------|-------------------------------|
| Pré Processamento | Processamento Avançado |
| Leitura dos Dados | Filtragem |
| Geometria | Deconvolução |
| Correção de Amplitude | Análise de Velocidades |
| Edição | Correção NMO |
| Mute | Empilhamento |

Table 1.1: Tabela esquematizando o fluxograma básico de processamento.

Uma importante etapa do processamento sísmico não abordada no fluxograma acima é a migração, que dentro do fluxograma de processamento pode aparecer tanto pré-empilhamento ou pós-empilhamento, cada qual com as suas vantagens e desvantagens, sendo que a pré-empilhamento apesar do relativo custo computacional apresenta melhores resultados (Silva, 2004). No entanto, como o objetivo desse trabalho é avaliar a eficiência de técnicas de filtragem, não realizaremos a migração do dado sísmico.

1.2 Pré Processamento

O pré processamento é uma etapa fundamental, na qual os dados serão reorganizados segundo o arranjo de aquisição, assim como a extração de alguns ruídos grosseiros que podem prejudicar todo o dado. Vale ressaltar, que os erros cometidos durante essa etapa podem comprometer todo o trabalho, portanto é necessária bastante atenção por parte do geofísico responsável pelo processamento.

1.2.1 Geometria

Essa é uma etapa fundamental no processamento sísmico, pois é nela que são inseridas algumas informações cruciais no cabeçalho (header) do dado sísmico. Informações estas importantes quanto ao tipo de aquisição que foi feita, como: posição de cada geofone em relação à fonte sísmica, valores de afastamentos (offsets), intervalo de tiros e de geofones, entre outros parâmetros de fundamental relevância (Dantas, 2014). Tais informações são obtidas através do relatório de aquisição, sendo fundamentais para a reorganização do dado em famílias CMP.

Vale ressaltar que, o CMP (Common Midpoint) e o CDP (Common Depth Point) são assumidos iguais para camadas planas e horizontais. Um erro cometido durante essa etapa pode acarretar perdas parciais ou totais do resultados obtidos nas demais etapas de

processamento. A Figura 1.1 esquematiza as informações essenciais a essa etapa do pré-processamento.

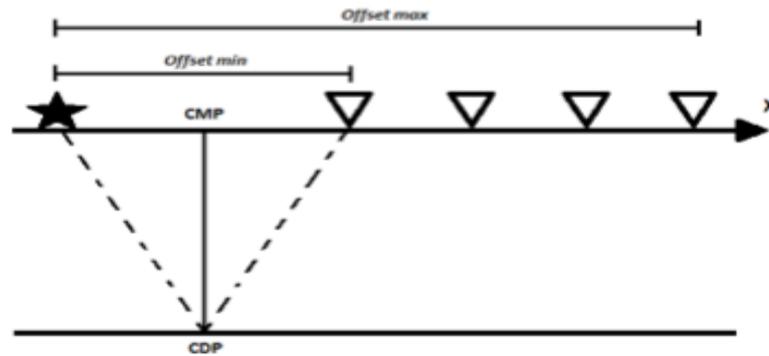


Figure 1.1: Parâmetros da geometria. Os triângulos representam os geofones e a estrela representa a fonte sísmica.

A utilização da plataforma GêBr é de grande utilidade nessa fase do processamento uma vez que a sua interface é mais amigável e diminui a dificuldade presente nos estágios iniciais de aprendizagem. Após terminada a geometria utilizando a plataforma GêBr, se espera encontrar as seguinte chaves do header com os seus respectivos valores.

- `tracl`: informa uma sequência numérica dos traços.
- `tracr`: informa uma sequência numérica dos traços.
- `fldr`: indica o número de sismogramas/número de registros/número de tiros.
- `cdp`: informa a coordenada de cada cdp ou o número do cdp.
- `offset`: informa os afastamentos do par fonte/receptor.
- `sx/sy`: coordenada (x,y) de cada ponto de tiro.
- `gx/gy`: coordenada (x,y) de cada receptor.
- `ns`: número de amostras.
- `dt`: intervalo de amostragem.

1.2.2 Correção de Amplitudes

A correção de amplitudes é uma etapa que se faz necessária quando os sismogramas apresentam uma difícil visualização das suas feições devido a perda de energia que a onda sofre ao se propagar no meio geológico por diversas razões. Portanto, para que a atenuação de ruidos seja mais eficiente faz-se necessário uma correção de amplitudes, que irá auxiliar na visualização do ruído e demais refletores.

Os principais mecanismos físicos que mais afetam o sinal sísmico e consecutivamente estão envolvidos na perda de energia são: divergência esférica, absorção, perdas por transmissão. No entanto, existem outros processos que também influenciam na perda de energia, como : reflexão de múltiplas e a curvatura da superfície do refletor (Dantas, 2014).

Portanto, utiliza-se a correção de amplitudes para tentar aproximar a amplitude sinal sísmico a amplitude da onda no momento em que ela saiu da fonte sísmica.

1.2.3 Edição e Mute

A inspeção visual dos ruidos presentes no dado sísmico é uma maneira de tratá-los, seguida da remoção total ou parcial do traço sísmico contaminado. A remoção de traços ruidosos pode ser feita inicialmente de maneira automática, posteriormente é feita de maneira manual através de dois processos conhecidos como “Edição e Mute”.

Vale ressaltar que, a eliminação de traços de um sismograma deve ser bem criteriosa para que não haja perda de informações úteis ao processo de imageamento da subsuperfície. Os principais traços editados em um sismograma são: traços com baixa razão sinal/ruído; traços com amplitude zero (mortos); com sinal em monofrequência; traços com ruído aleatório devido ao mal acoplamento dos geofones e a ondas na superfície seja da água ou do próprio solo que provoquem vibrações no cabo (Santos, 2014).

O processo de mute envolve a definição uma função mute acima do tempo que se admite registro de sinal e eliminar essa região, pois atribui-se a essa região ruidosa a ruidos ambientais ou ao mau funcionamento dos receptores, neste caso geofones (Dantas, 2014).

1.3 Processamento Avançado

É no processamento avançado que começa a etapa de imageamento, na qual através de técnicas geofísicas (algoritmos matemáticos) procura-se obter uma imagem de boa resolução e alta razão sinal/ruído, que irá representar as estruturas geológicas em subsuperfície.

1.3.1 Filtragem

A etapa de filtragem dos dados sísmicos consiste basicamente na atenuação dos ruídos indesejáveis presentes no dado. Uma vez realizada a filtragem, é fácil avaliar a sua eficiência tendo em vista que se eficiente ela tem como resultado a melhora da razão sinal/ruído assim como a obtenção de uma seção empilhada de boa qualidade.

Existem diversos métodos de filtragem disponíveis e alguns sendo testados, no entanto faz-se necessário o conhecimento do tipo de ruído que se deseja atenuar, uma vez que os diferentes ruídos possuem características peculiares. A exemplo de métodos de filtragem, temos os filtros de frequências 1D e 2D que são muito utilizados na atenuação de ruídos de altas e baixas frequências.

Dados sísmicos adquiridos em bacias terrestres são conhecidos pela presença principalmente de ruídos do tipo *ground-roll*, o qual está diretamente relacionado com a propagação das ondas superficiais do tipo *Rayleigh*. Esse tipo de ruído possui algumas características peculiares, tais como: baixa frequência e altas amplitudes, o que o torna bastante indesejável uma vez que ele mascara as reflexões sísmicas.

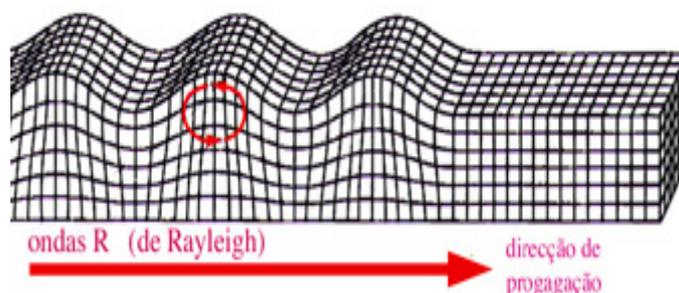


Figure 1.2: Mecanismo de propagação da onda superficial Rayleigh.

Os dados de sísmica de reflexão da Bacia do Tacutu, além de possuírem uma baixa cobertura, apresenta uma alta concentração do ruído coerente *ground-roll*, tornando-se um desafio obter seções sísmicas com alta resolução nessa bacia (Santos, 2014). Portanto, o processo de filtragem nesse dado em especial possui fundamental importância nesse trabalho.

A Figura 1.3 mostra o efeito do *ground-roll* numa seção de tiro comum, o qual aparece no dado como um cone de altas amplitudes e baixas frequências mascarando as reflexões como dito anteriormente, desta forma prejudica a etapa da análise de velocidade e consecutivamente a obtenção da seção sísmica empilhada.

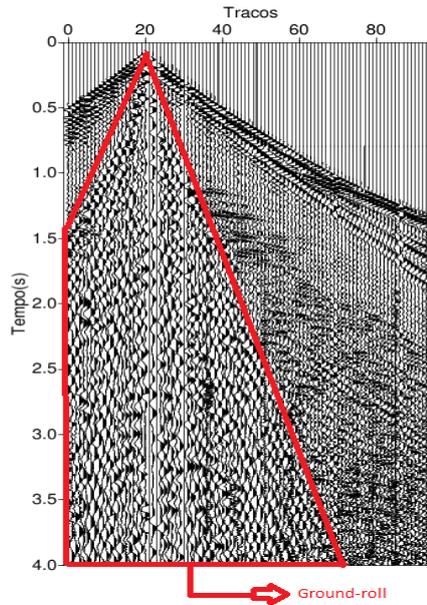


Figure 1.3: Tiro contaminado pelo ground-roll.

Afim de testar a eficiência dos filtros a serem aplicados na seção sísmica, é necessário que seja separado uma seção de tiro comum, a qual deve apresentar características média dos tiros e possuir o ruído que se deseja filtrar bem evidente assim como reflexões afinal deseja-se atenuar o ruído e melhorar a resolução das reflexões. Uma vez alcançado os parâmetros ótimos desse filtro, faz-se a aplicação da filtragem no resto do dado sísmico, economizando assim bastante tempo no processamento.

1.3.2 Deconvolução

O objetivo do processo de deconvolução é obter a maior resolução temporal possível através da compressão do pulso sísmico, convertendo-o em um impulso. Por esse motivo é considerada uma das etapas principais dentro do processamento sísmico, considerada por Yilmaz (2001), como uma das três etapas primárias do processamento sísmico, juntamente com o empilhamento e a migração. A deconvolução vem sendo utilizada também como um método de filtragem, principalmente para atenuação de múltiplas em dados marinhos. No entanto, a deconvolução pode também ser utilizada com outras aplicações, como por exemplo atenuador de ground-roll em dados terrestres, por esse ser considerado também um ruído coerente.

A teoria do processo deconvolucional para compressão do pulso sísmico apresentada a seguir foi baseada em Yilmaz (2001). Pode-se definir a equação do traço sísmico, $x(t)$, como:

$$x(t) = e(t) * w(t) \quad (1.1)$$

Onde $e(t)$ é a função refletividade das camadas terrestres e $w(t)$ é a wavelet da fonte

sísmica. Ao considerarmos um filtro $f(t)$, definido de tal forma que esse filtro convolvido com o sismograma irá resultar na estimativa da resposta impulsiva da Terra, teremos:

$$e(t) = f(t) * x(t) \quad (1.2)$$

Substituindo na equação (1.1), temos:

$$x(t) = w(t) * f(t) * x(t) \quad (1.3)$$

Ao eliminar-se $x(t)$, temos:

$$\delta(t) = w(t) * f(t) \quad (1.4)$$

Onde $\delta(t)$ é a função delta de Kronecker (Yilmaz, 2001). Resolvendo para $f(t)$, temos:

$$f(t) = \delta(t) * w(t)^{-1} \quad (1.5)$$

Com base nas deduções acima, fica evidente que o filtro ideal é aquele que é o inverso da wavelet. Para o caso em que $w(t)$ é conhecida, temos um processo de deconvolução determinística, caso contrário usa-se a deconvolução de Wiener-levinson para o cálculo do filtro inverso (Yilmaz, 2001).

1.3.3 Análise de Velocidades

O objetivo dessa etapa é estimar as velocidades das camadas em subsuperfície, que serão utilizadas nas etapas seguintes, como correção NMO, empilhamento e migração. Essa etapa consiste basicamente em estimar as velocidades que horizontalizem os refletores em cada CMP. Portanto, pode-se afirmar que a análise de velocidades é, sem sombra de dúvidas, uma das etapas cruciais do processamento sísmico.

A presença de ruídos coerentes pode prejudicar a análise de velocidade uma vez que o espectro de velocidades que é gerado para o cálculo das velocidades leva em consideração a coerência dos eventos na seção, portanto esses ruídos podem gerar falsos positivos no "picking" de velocidades.

Sendo assim, após a aplicação dos filtros para atenuação dos ruídos, a análise de velocidade é feita novamente com intuito de comparar os painéis de *semblance* original e filtrado e verificar tanto eliminação de falsos positivos quanto o aumento da razão sinal ruído. Vale ressaltar que, por se tratar de um dado de baixa cobertura da Bacia de Tacutu, fez-se

necessário a obtenção de *supergathers* com o auxílio de *shells script*. Essa técnica *supergather*, tenta reagrupar e juntar informações de outros tiros correspondentes a CMPs próximos, gerando um sismograma que representa a média de vários CMPs, correspondente a uma área e não mais a um único ponto (Dantas, 2014).

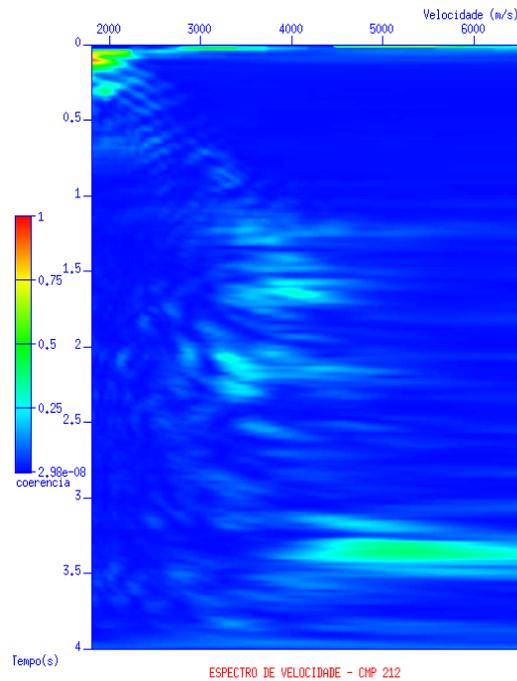


Figure 1.4: Espectro de velocidades ilustrativa de uma família CMP da linha sísmica da Bacia do Tacutu.

1.3.4 Correção NMO

Em aquisições de dados sísmicos 2D, fontes e receptores são movidos ao longo de uma linha reta. A distância entre a fonte (S) e cada receptor (R) é chamado de afastamento ou *offset* (X).

Para um meio horizontalmente estratificado com velocidade constante (V), ao reorganizarmos o tiro em famílias CMP, teremos uma representação de traços que correspondem a eventos em subsuperfície e que possuem um ponto comum (M) que é definido como o ponto médio entre uma fonte e um receptor. A reorganização em famílias CMP representa todos os raios que incidem no mesmo ponto refletor, dessa maneira uma família CMP contém informação redundante da subsuperfície e essa é a base para o empilhamento CMP.

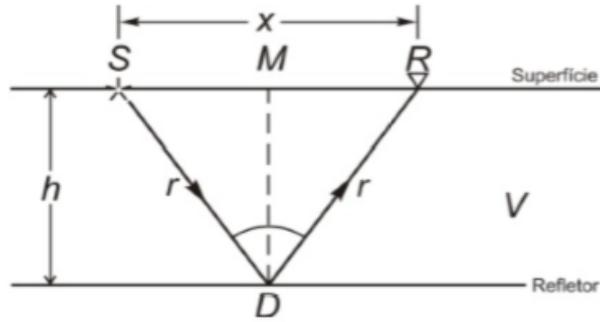


Figure 1.5: Geometria para uma onda refletida numa única camada horizontal. O ponto M correspondente ao ponto médio entre a fonte S o receptor R. Adaptado de Danilo Cruz(2014).

Se partirmos de um modelo de uma camada plana e horizontal temos que o tempo de trânsito para essa reflexão será dado por:

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + \frac{4h^2}{V^2} \quad (1.6)$$

fazendo $t_0^2 = \frac{4h^2}{V^2}$, temos:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (1.7)$$

Onde V é a velocidade do meio acima do refletor, e t_0 é o tempo de percurso para afastamento nulo, ou seja, o tempo de percurso medido para fonte e receptor na mesma posição ($x = 0$) (Dantas, 2014). A equação (1.7) representa uma hipérbola e esse efeito hiperbólico pode ser removido através da correção *normal moveout*, que implica em trazer eventos de tempo de percurso t para tempos de percurso de afastamento zero t_0 . O que se chama de *normal moveout* é a diferença entre o tempo de trânsito de reflexão da onda a um dado afastamento x e o tempo de trânsito para o afastamento nulo, com incidência normal (Yilmaz, 2001):

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \sqrt{1 + \left(\frac{x}{Vt_0}\right)^2} - t_0 \quad (1.8)$$

Após a aplicação da correção NMO nas famílias CMP, os eventos hiperbólicos associados às reflexões em subsuperfície estarão horizontalizados. Quando os traços de uma família CMP já estão corrigidos de *normal moveout*, eles são somados e teremos apenas um traço, conhecido como traço de afastamento nulo ou zero-offset. Caso a velocidade NMO usada na equação (1.7), seja maior que a velocidade do meio, ocorrerá uma subcorreção, por outro

lado, se a velocidade utilizada for inferior a velocidade do meio, teremos uma sobrecorreção, sendo assim o evento não estará totalmente horizontalizado.

1.3.5 Empilhamento

O empilhamento consiste na soma de todas as amplitudes dos sinais presentes numa família CMP depois de horizontalizados. O objetivo dessa etapa é reforçar os traços dos sinais coerentes através da interferência construtiva desses eventos, como também a atenuação de ruídos através da interferência destrutiva que ocorre no processo de empilhamento. A melhoria da razão sinal-ruído dependerá do grau de coerência alcançada nos eventos de interesse (reflexões). A equação para o empilhamento normalizado é dada por:

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(t), \quad (1.9)$$

onde $A(t)$ é a amplitude do traço empilhamento no tempo t , N o número de traços ou cobertura da família CMP, i o índice indicador do traço, $a_i(t)$ o valor da amplitude do traço i no tempo t . Faz-se necessário salientar que a escolha das velocidades durante a etapa de análises de velocidade é fundamental nessa etapa, uma vez que o campo de velocidades utilizado no processo de empilhamento irá definir a qualidade da seção sísmica gerada.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos das técnicas de filtragem utilizadas nesse trabalho, como também os procedimentos utilizados para efetuar as filtrações. Cada uma das técnicas possuem peculiaridades que serão descritas nesse capítulo, contudo a filtragem SVD e a Deconvolução no domínio da frequência compartilham uma etapa em comum que é a transformada de Fourier que leva o dado sísmico do domínio do tempo para o domínio da frequência. Portanto, faz-se necessário uma breve introdução a Transformada de Fourier.

2.1 A Transformada de Fourier

A teoria dessa seção é baseada parte em (Yilmaz, 2001) e parte nas notas de aula de Porsani (2008). A transformada de Fourier, criada por Joseph Fourier, é uma transformação matemática que expressa uma função de tempo como uma função de frequência. Dada uma função contínua $x(t)$ de uma única variável t , sua transformada de Fourier é definida pela seguinte integral:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-iwt) dt, \quad (2.1)$$

onde w é a frequência angular. A frequência temporal f está relacionada com a frequência angular através da seguinte relação $w = 2\pi f$. A transformada de Fourier é reversível; isto é, dado $X(w)$, a sua função tempo correspondente é dada por:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(w) \exp(iwt) dw, \quad (2.2)$$

A seguinte convenção de sinais será utilizado neste trabalho, para a transformada direta, o sinal do argumento no expoente é negativo se a variável for o tempo e positiva se a variável for o espaço. É claro que, as respectivas transformadas inversas terão sinais opostos do utilizado na transformada direta $X(w)$ é geralmente uma função complexa. Utilizando-se as propriedades das funções complexas, $X(w)$ pode ser expressa por duas outras funções de

frequência:

$$X(w) = A(w)\exp[i\phi(w)], \quad (2.3)$$

onde $A(w)$ e $\phi(w)$ são os espectros de amplitude e de fase, respectivamente. Estes podem ser calculados através das seguintes equações:

$$A(w) = \sqrt{[X_r^2(w) + X_i^2(w)]}, \quad (2.4)$$

$$\phi(w) = \arctan[X_i(w)/X_r(w)], \quad (2.5)$$

onde $X_r(w)$ e $X_i(w)$ são as partes real e imaginária da transformada de Fourier $X(w)$, respectivamente. Quando $X(w)$ é expresso em termos de suas componentes real e imaginária, ela pode ser escrita como:

$$X(w) = X_r(w) + iX_i(w), \quad (2.6)$$

e comparando com a equação (2.3), note que:

$$X_r(w) = A(w) \cos \phi(w) \quad (2.7)$$

e

$$X_i(w) = A(w) \sin \phi(w), \quad (2.8)$$

Nós agora vamos considerar as funções $x(t)$ e $y(t)$. Alguns teoremas básicos que são úteis em várias aplicações da transformada de Fourier estão listados abaixo:

1- Adição:

$$x(t) + y(t) \Leftrightarrow X(w) + Y(w) \quad (2.9)$$

2- Multiplicação:

$$x(t)y(t) \Leftrightarrow X(w) * Y(w) \quad (2.10)$$

3- Convolução:

$$x(t) * y(t) \Leftrightarrow X(w)Y(w) \quad (2.11)$$

4- Auto-Correlação:

$$x(t) * x(-t) \Leftrightarrow |X(w)|^2 \quad (2.12)$$

5- Derivada:

$$\frac{dx(t)}{dt} \Leftrightarrow iwX(w) \quad (2.13)$$

Existe também o caso da transformada dupla de Fourier, ou transformada 2D, em que por exemplo passa-se uma função do domínio tx para o domínio fk através da utilização de integral dupla. No entanto, esse trabalho só utiliza apenas a teoria da transformada em uma dimensão, já que o domínio do espaço é mantido, tx para fx .

Contextualizando a teoria acima para o caso do sinal sísmico que é representado por uma matriz, podemos representar os N valores de um sinal $a(t)$ através da sequência $a_m = (a_0, a_1, \dots, a_{N-1})$, sendo amostrados nos pontos $m\Delta t$, $a_m = a_{m\Delta t}$, $m = 0, 1, \dots, N - 1$. Podemos definir então nesse caso, que a transformada de Fourier, agora chamada de TDF (Transformada Discreta de Fourier), dos elementos dessa matriz pode ser calculada como:

$$a_n = \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{a}_m w^{mn}, \quad (2.14)$$

$$\tilde{a}_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} a_m w^{-mn}, \quad (2.15)$$

onde w representa os elementos da matriz de funções harmônicas complexas, podendo ser calculados por:

$$w^{mn} = \exp(i \frac{2\pi}{N} nm), \quad (2.16)$$

sendo n o índice correspondente às colunas da matriz W e está relacionado com as frequências da função harmônica e m o índice correspondente às linhas, e está relacionado a variável tempo (ou espaço). As equações (2.15) e (2.14) fornecem os coeficientes da TDF direta e inversa respectivamente.

A obtenção da TDF inversa e direta através das equações (2.15) e (2.14), respectivamente, requerem um total de N^2 operações computacionais. Um algoritmo rápido que requer apenas $N \log N$ operações pode ser desenvolvido quando o número de pontos N é potência de 2, exemplo, 16, 32, 64, 2048. Este método é conhecido como a transformada rápida de Fourier (FFT), e ele explora o relacionamento existente entre os coeficientes de

Fourier quando se trabalha com a potência de 2. Numa transformada inversa para $N=4$, por exemplo, podemos escrever:

$$\mathcal{F}^{-1}\{\tilde{a}_n\} = \{a_0, a_1, a_2, a_3\}, \quad (2.17)$$

Apenas 4 números distintos, dispostos sobre o círculo de raio unitário, preenchem a matriz W_4 ,

$$\{w^{nm}\} = \{\exp(i\frac{2\pi}{4}nm)\} = \{1, i, -1, -i\}, \quad (2.18)$$

O sistema de equações correspondente, $W_4\tilde{a}_4 = a_4$:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \\ \tilde{a}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

que também pode ser escrito na forma:

$$\begin{bmatrix} W_2 \begin{bmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} W_2 \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_3 \end{bmatrix} \\ W_2 \begin{bmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} W_2 \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_3 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ou ainda,

$$\begin{bmatrix} I_2 & \Sigma_2 \\ I_2 & -\Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_2^0 \\ \tilde{a}_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

onde,

$$\Sigma_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\tilde{a}_2^0 = W_2 \begin{bmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\tilde{a}_2^1 = W_2 \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Reduzindo assim o número de operações matemáticas envolvidos e, conseqüentemente, o custo computacional necessário para rodar o programa.

2.2 Filtragem no Domínio da Frequência

Os métodos de filtragem SVD e deconvolução são métodos que atuam de modo fácil e rápido com dados reais, para utilizarmos esses métodos no domínio da frequência, fazemos uso de uma propriedade da Transformada de Fourier (TF) que afirma que: a TF de um sinal real e par é também real e par (Ferreira, 2010).

Tomando um conjunto de dados sísmicos X , cada traço $x(t)$ do dado com ns amostras deve ser representado por um vetor real e par $y(t)$, tal que $y(w) = \mathcal{F}\{y(t)\}$ seja também um sinal real e par. Após a aplicação do método, encontra-se o dado filtrado no domínio da frequência $z(w)$ e, finalmente, o dado filtrado no domínio do tempo $z(t) = \mathcal{F}^{-1}\{z(w)\}$.

1. Procedimento:

- (a) A subrotina utilizada para realizar a TF pressupõe que o número de elementos do sinal $y(t)$ seja:

$$nft = 2^n > 2 * ns \quad (n = 0, 12, 3\dots) \quad (2.25)$$

- (b) Seja o traço $x(t) = x_1, x_2, x_3, \dots, x_{ns-1}, x_{ns}$, obtemos o vetor:

$$y(t) = x_1, x_2, x_3, \dots, x_{ns-1}, x_{ns}, 0, 0, \dots, 0, \dots, 0, 0, x_{ns}, x_{ns-1}, \dots, x_3, x_2 \quad (2.26)$$

É importante salientar que:

- $y(t)$ é obtido espelhando-se o traço $x(t)$ em relação ao ponto nft ;
- para que a periodicidade seja assegurada, a última amostra do vetor $y(t)$ deve ser $y(nft) = x(2)$;
- as amostras intermediárias $y(ns + 1), y(ns + 2), \dots, y(nft - ns + 1)$ devem ser zeradas e o número dessas amostras zeradas é sempre ímpar.

2. Obtenção do dado no domínio da frequência $y(w)$: O dado de entrada no domínio da frequência $y(w)$, para aplicação do método SVD ou deconvolução é obtido aplicando-se a Transformada Direta de Fourier (TDF) no vetor $y(t)$:

$$y(w) = \mathcal{F}\{y(t)\}, \quad (2.27)$$

3. A exemplo da aplicação da deconvolução no dado $y(w)$: Aplica-se o método de deconvolução (como descrito no item 2.3.5) para cada frequência de *Nyquist*, chegando por fim ao dado deconvolvido $z(w)$.

4. Aplicação da Transformada Inversa de Fourier no dado.

$$z(t) = \mathcal{F}^{-1}\{y(t)\}, \quad (2.28)$$

onde $z(t)$ é o dado filtrado no domínio do tempo

Quando os dados são transformados do domínio do tempo e distância para o domínio da frequência e distância, através da transformada 1D de Fourier, uma fatia de tempo é então agora convertida para uma fatia de frequência, e cada amostra dos dados transformados tem tanto a componente real como a componente imaginária. Eventos com mergulho similar aparecem como um sinal senoidal complexo ao longo da fatia de frequência. Isto é, eles terão sua forma alterada no sismograma e passam a poder ser descritos na forma: $\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$.

A Figura 2.1 mostra um esquema apenas ilustrativo dos passos citados nessa seção, em cada traço real.

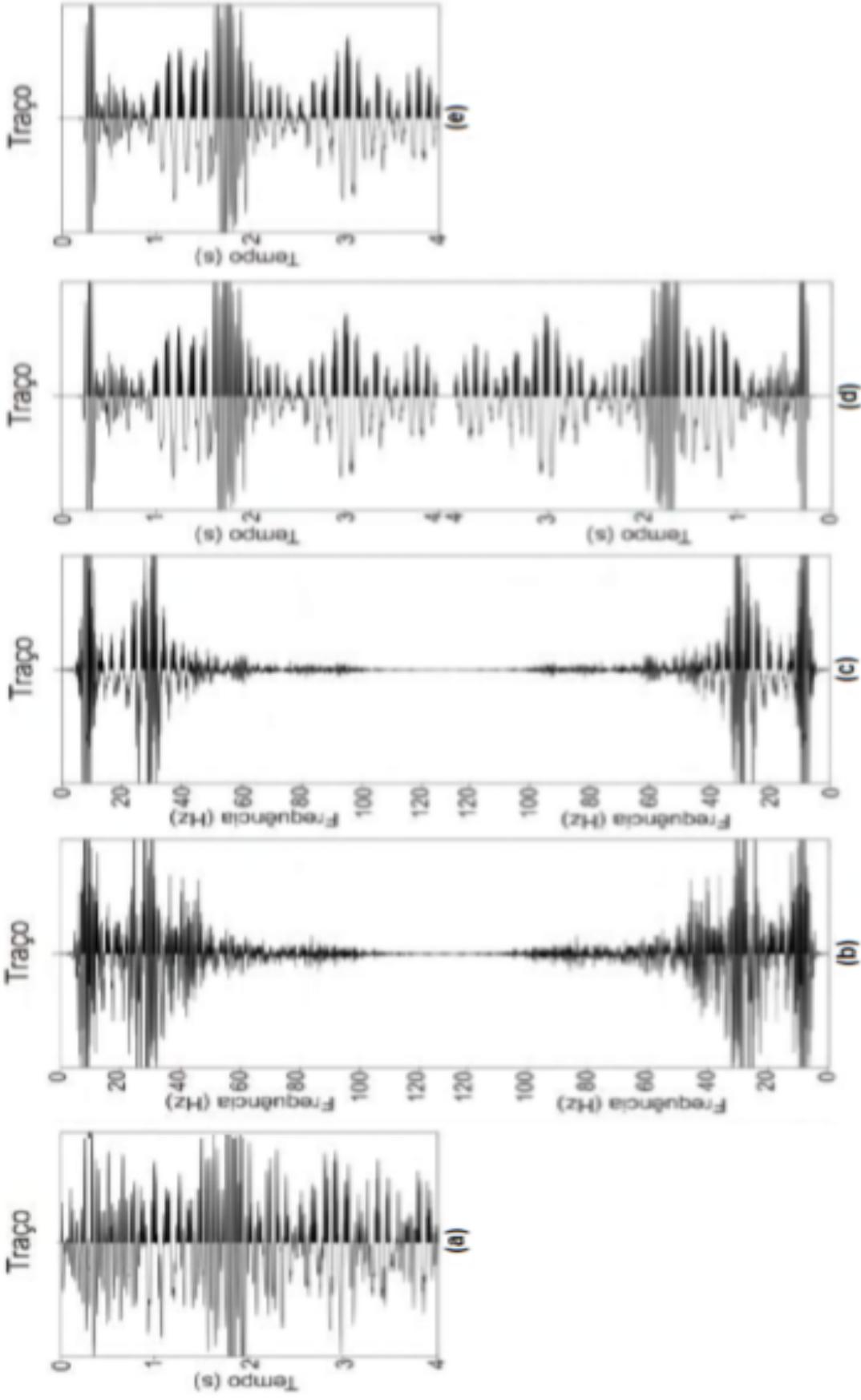


Figure 2.1: (a) traço original no domínio do tempo; (b) traço passado pro domínio da frequência, note o espelhamento na frequência equivalente a 125 Hz; (c) traço no domínio da frequência após o processo de deconvolução; (d) traço ainda espelhamento no domínio do tempo; (e) traço passado de volta pro domínio do tempo e deconvolvido (Ferreira,(2010)).

2.3 Deconvolução de Dados Sísmicos

Como descrito anteriormente no capítulo de processamento sísmico, a deconvolução dos dados sísmicos é uma etapa do processamento sísmico de fundamental importância, uma vez que através da deconvolução é possível atingir uma maior resolução temporal dos dados, através da compressão do pulso sísmico, convertendo-o em impulso. Nesse trabalho a aplicação dessa técnica foi utilizada como um método de filtragem com o objetivo de atenuar ruídos do tipo *ground-roll* em dados terrestres, por esse ser considerado um ruído coerente. Portanto, nesse capítulo serão abordados alguns conceitos essenciais no método de deconvolução assim como a descrição do método de Deconvolução Adaptativa no Domínio da Frequência utilizado nesse trabalho.

2.3.1 O Modelo Convolutacional do Traço Sísmico

Sabe-se que o traço sísmico é composto por uma superposição de assinaturas da fonte sísmica, tal que pode ser representado por um modelo matemático chamado modelo convolutacional:

$$x_t = p_t * e_t + \eta_t, \quad (2.29)$$

onde,

- x_t representa o traço sísmico;
- p_t representa o pulso sísmico;
- e_t é a função refletividade, ou resposta impulsiva;
- η_t é o ruído aditivo ao sinal sísmico;
- $*$ representa a operação de convolução;

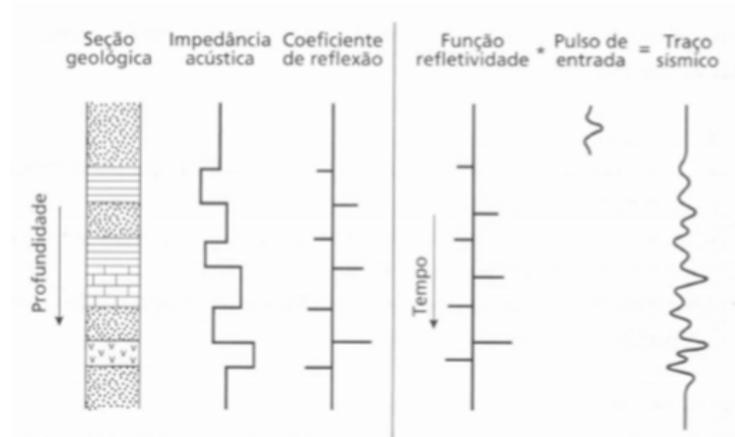


Figure 2.2: Modelo Convolutional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (Brooks,2009).

No entanto, para que o modelo convolutional possa ser utilizado na construção do traço sísmico são necessárias algumas considerações (Yilmaz, 2001):

- A Terra é constituída por camadas horizontais com velocidade constante.
- A fonte sísmica gera uma onda compressional plana cuja incidência nas camadas é normal.
- A frente de onda é estacionária, despreza-se as perdas por absorção e o decaimento de amplitude;
- O ruído η_t é nulo;
- A assinatura da fonte é conhecida;

Nos levantamentos sísmicos realizados o que se deseja obter é a função refletividade e_t que nada mais é do que a resposta impulsiva da Terra, porém a assinatura da fonte sísmica e os ruídos de várias origens (ambiental, instrumental etc.) são registrados também pelos sensores o que dificulta o conhecimento dessa função. A deconvolução de Wiener-Levinson tem como objetivo recuperar a função refletividade levando em consideração todas as premissas vistas acima, aumentando assim a resolução temporal dos dados e consecutiva melhora na identificação das litologias presentes na região estudada.

Usualmente, desconhece-se a assinatura da fonte sísmica, sendo assim o problema de deconvolução é resolvido de forma estatística.

A equação (2.29), para um filtro de $N + 1$ coeficientes, pode ser reescrita como o seguinte somatório:

$$x_t = \sum_{k=0}^N p_k * e_{t-k} + \eta_t, \quad (2.30)$$

Sabendo que a deconvolução de uma sequência qualquer é a convolução da mesma com seu

filtro inverso, para recuperar a função refletividade, basta deconvolver o pulso p_t , através da convolução do traço sísmico com o filtro inverso desse pulso sísmico. Assumindo que \tilde{h}_t é uma aproximação do filtro inverso do pulso p_t , temos que:

$$\tilde{h}_t \approx p_t^{-1} \quad (2.31)$$

$$\tilde{h}_t * p_t = \delta_t, \quad (2.32)$$

onde δ_t representa o delta de Kronecker. Convolvendo filtro inverso com a equação (2.29):

$$\tilde{h}_t * x_t = \tilde{h}_t * p_t * e_t + \tilde{h}_t * \eta_t \quad (2.33)$$

$$= \delta_t * e_t + \tilde{h}_t * \eta_t \quad (2.34)$$

$$= e_t + \tilde{h}_t * \eta_t \quad (2.35)$$

Partindo da premissa que o ruído é desprezível, observa-se que a convolução do traço com o filtro inverso restitui a refletividade. Conhecendo o pulso, é possível resolver o sistema de $N + 1$ equações com base no método de mínimos quadrados e encontrar o filtro ótimo que deconvolve o traço a partir das equações normais abaixo:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \cdots & r_N \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_1 \\ r_N & \cdots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{h}_0 \\ \tilde{h}_1 \\ \vdots \\ \tilde{h}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

onde r_k representa o coeficiente k da função de autocorrelação do pulso,

$$r_k = \sum_t p_t p_{t+k}. \quad (2.37)$$

Essa matriz é simétrica em relação a diagonal e é chamada de matriz de autocorrelação banda estruturada de Toeplitz, a qual pode ser resolvida através da recursão de Levinson (Porsani, 1986).

2.3.2 A Deconvolução Preditiva de Wiener-Levinson

O tipo de deconvolução mais difundido dentro do processamento sísmico é conhecido como deconvolução de Wiener-Levinson. Nessa técnica estão inerentes duas premissas:

- O pulso é de fase mínima.
- A refletividade é branca.

Sabe-se que o pulso sísmico é dito de fase mínima quando o seu polinômio $P(z)$ tem suas raízes no plano complexo Z , situadas fora do círculo unitário. Sendo assim o método de Wiener-Levinson possui as seguintes etapas:

- 1- Cálculo dos coeficientes da função de autocorrelação (FAC);
- 2- Obtenção o filtro inverso de Wiener-Levinson(WL);
- 3- Aplicação o filtro aos dados sísmicos, através da Deconvolução.

O filtro de WL é causal ($t = 0, \dots, N$), portanto é dito o inverso de um pulso de fase mínima, pois somente pulsos de fase mínima possuem filtros inversos causais. Sendo assim, a aplicação de WL atende a primeira premissa que requer que o pulso sísmico é de fase mínima. A obtenção da função de autocorrelação é vista como uma obstáculo no método de WL, uma vez que FAC é calculada diretamente a partir do traço sísmico já que o pulso sísmico não é conhecido. E para essa situação, a FAC do traço sísmico somente representa uma boa estimativa da FAC do pulso sísmico, quando a função refletividade é dita aleatória, ou branca (Yilmaz,2001;Ledesma,2011).

2.3.3 Filtro Inverso de Wiener-Levinson

O traço sísmico x_t pode ser representado por meio de um modelo linear preditivo,

$$\tilde{x} = \tilde{a}_1 x_{t-1} + \dots + \tilde{a}_N x_{t-N}, \quad (2.38)$$

onde o resíduo é $e_t = x_t - \tilde{x}_t$ e dado por:

$$e_t = x_t - \tilde{a}_1 x_{t-1} - \dots - \tilde{a}_N x_{t-N} \quad (2.39)$$

A equação acima também pode ser escrita na sua forma matricial:

$$e_t = \begin{bmatrix} x_t & x_{t-1} & \cdots & x_{t-N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

com $a_j = -\tilde{a}_j$. A exemplo do sistema de equações associados a forma matricial da equação (2.40) para um filtro com 3 coeficientes, tem-se:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \\ e_{M+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & 0 \\ x_3 & x_2 & x_1 & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & x_{M-1} & x_{M-2} & x_{M-3} \\ 0 & x_M & x_{M-1} & x_{M-2} \\ 0 & 0 & x_M & x_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

A forma quadrática que corresponde ao vetor de erro de predição é dado por: $\sum_i e_i^2 = Q(a)$. Os coeficientes do operador de erro (OPE) devem ser calculados de maneira que o erro quadrático seja mínimo. Minimizando o erro quadrático em relação aos parâmetros a_j ($j = 1, 2, 3$), resulta nos sistema de equações normais, sendo representado pela seguinte forma matricial expandida:

$$\begin{bmatrix} r_o & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

onde E_{a3} representa a soma total dos mínimos quadrados minimizados e r_k ($k = 0, 1, 2, 3$) representa os coeficientes da função de autocorrelação do traço sísmico $x(t)$,

$$r_k = \sum_t x_t x_{t+k}. \quad (2.43)$$

A matriz das equações normais possui bandamentos em relação à diagonal principal e é conhecida como matriz de autocorrelação banda-estruturada Toeplitz cujos coeficientes representam uma estimativa da autocorrelação do pulso sísmico. O sistema de equações pode ser resolvido através da recursão de Levinson (Porsani, 1986).

2.3.4 Deconvolução na Forma Adaptativa

Tradicionalmente, a deconvolução é realizada utilizando-se todo o traço sísmico para calcular as funções de autocorrelação e estimar assim o filtro inverso que deconvolve o próprio traço. No entanto, esse processo pode realizado de forma adaptativa, se tomarmos uma janela deslizante, com comprimento fixo, fazendo-a mover e calcular o filtro para cada porção do traço.

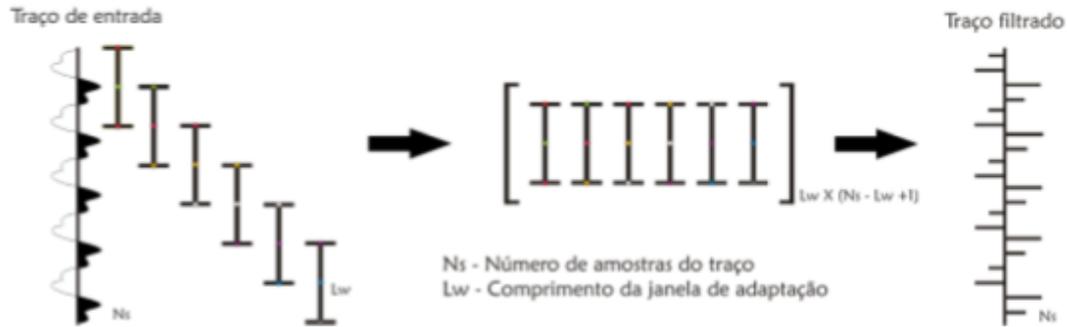


Figure 2.3: O processo de deconvolução adaptativa

Esse procedimento é conhecido como adaptativo, pois, o filtro se adapta as mudanças na forma de pulso que ocorrem quando ele se propaga em subsuperfície, trazendo o processo deconvolutivo mais próximo das condições reais e aumentando assim a eficiência do mesmo (Alves, 2013).

O procedimento de adaptação calcula o filtro para toda a janela, contudo somente a primeira amostra da janela é utilizada para compor o traço filtrado, a janela se desloca uma amostra e o processo se repete $(ns-lw+1)$ vezes, até que todas as amostras sejam deconvolidas.

2.3.5 O Método de Deconvolução no Domínio da Frequência

A deconvolução do dado sísmico tem como principais objetivos a melhora da resolução temporal do dado, através da compressão efetiva da *wavelet* da fonte; e a supressão de ruídos periódicos ou lineares indesejados, como no caso das múltiplas. Contudo, uma nova abordagem foi realizada no trabalho de Dantas (2014) onde a deconvolução adaptativa foi utilizada com a finalidade de testar a eficiência da deconvolução em dados terrestres na atenuação do ruído *ground-roll*.

Tendo em vista esse objetivo, o dado é primeiramente levado para o domínio fx através da transformada 1D de Fourier, fazendo com que o ruído passe a ter um comportamento periódico e concentrado nessas baixas frequências. A deconvolução realizada no domínio da frequência possibilita a atenuação de ruídos aleatórios na direção espacial da seção, através do uso de uma versão complexa do filtro adaptativo de Wiener-Levinson.

O programa utilizado nesse trabalho foi desenvolvido por Dantas e Porsani (2014). O fluxograma a seguir contém os passos do programa para se realizar a deconvolução multicanal no domínio da frequência:

1. O primeiro passo do programa é ler o dado, já em acesso direto com a matriz de ordem

- ns por nx e salva as informações em xt ;
2. Em seguida, é xt , de forma que a leitura das informações seja em cada linha ao invés de cada coluna;
 3. A subrotina principal $dec-fx$ é chamada;
 - (a) Uma subrotina chamada $pot2$ é utilizada para calcular a potência de 2 mais próxima de ns , esse valor é salvo como NFT que será utilizado na transformada de Fourier.
 - (b) Outra subrotina $tx2fx$ é chamada para passar a matriz de dados para o domínio da frequência.
 - i. Linha por linha de xt é salva na variável complexa $xaux$, a qual possui a parte imaginária nula.
 - ii. Um espelhamento vertical é criado em $xaux$ até duas vezes o valor de NFT para que a técnica de FFT possa ser utilizada;
 - iii. A subrotina $fft-por$ é utilizada, a qual realiza a transformada rápida de Fourier dos coeficientes de $xaux$;
 - iv. Em seguida escreve-se os valores de $xaux$ em xf , somente até valor da variável NFT ;
 - (c) Realiza-se a transposta da matriz xf , escrevendo os valores na nova variável $xaux2$;
 - (d) Chamamos a subrotina $mc-dec-panel$, a qual realiza a deconvolução adaptativa multicanal de Wiener-Levinson tendo como parâmetros a distância de predição (L) e o número de canais (nc), salva o resultado em $xaux3$;
 - (e) Realiza-se a transposta de volta de $xaux3$ e escreve em $xf2$;
 - (f) Usamos a subrotina $fx2tx$ para fazer a FFT inversa utilizando os mesmos passos da FFT direta;
 4. Finalmente, escrevemos a matriz deconvolvida $xdec.ad$.

2.4 Filtragem SVD

Nessa seção seram apresentados os fundamentos teóricos cruciais na decomposição de uma matriz em valores singulares, a qual é conhecida como uma técnica muito útil no processamento de dados sísmicos uma vez que permiti a separação entre eventos correlacionáveis (reflexões) e eventos não correlacionáveis (ruídos, tal como *ground-roll*).

A decomposição em valores singulares SVD (*Singular Value Decomposition*) é feita em uma matriz \mathbf{D} organizada na forma $m \times n$ que representa os dados sísmicos. Cada elemento dessa matriz, d_{ij} , representa a amplitude que é registrada por cada receptor j em um determinado instante de tempo i , devido a uma excitação imposta a Terra (Freire, 1986).

A representação da matriz \mathbf{D} dá-se pela seguinte notação:

$$D = d_{ij} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, M \\ j = 1, 2, \dots, N \end{array} \quad (2.44)$$

2.4.1 Matrizes de Covariância

A importância das matrizes de covariância está diretamente relacionada a obtenção da decomposição de valores singulares uma vez que os vetores de base da decomposição são autovetores associados a essas matrizes.

A primeira matriz de covariância \mathbf{DD}^T de ordem m é obtida através do produto interno dos traços sísmicos o que significa que cada elemento d_{ij} é a projeção do traço i sobre o traço j . Sendo que, os elementos da diagonal representam a correlação dos traços sísmicos enquanto que os demais elementos da matriz são correlações cruzadas entre os traços. Assim, a soma dos elementos da diagonal \mathbf{DD}^T representa o conteúdo total de energia em \mathbf{D} e os elementos de fora da diagonal representam o grau de correlação entre os traços (Freire, 1986).

$$\mathbf{DD}^T = \begin{bmatrix} \sum_j d_{1,j}^2 & \sum_j d_{1,j}d_{2,j} & \cdots & \sum_j d_{i,1}d_{m,j} \\ \sum_j d_{2,j}d_{1,j} & \sum_j d_{2,j}^2 & \cdots & \sum_j d_{i,2}d_{m,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_j d_{m,j}d_{1,j} & \sum_j d_{m,j}d_{2,j} & \cdots & \sum_j d_{m,j}^2 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

A segunda matriz de covariância $\mathbf{D}^T\mathbf{D}$ de ordem n é constituída pelo produto interno entre as linhas de \mathbf{D} , que representam amostras de \mathbf{D} em determinado instante de tempo j . Consequentemente, cada elemento de $\mathbf{D}^T\mathbf{D}$ indicam o tempo \mathbf{j} e com que intensidade a correlação existe. As informações registradas em cada instante de tempo estão presentes na diagonal principal de \mathbf{D} e os elementos fora da diagonal fornecem o grau de correlação entre dois

instantes distintos (Freire, 1986).

$$\mathbf{D}^T \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \sum_i d_{i,1}^2 & \sum_i d_{i,1}d_{i,2} & \cdots & \sum_i d_{i,1}d_{i,n} \\ \sum_i d_{i,2}d_{i,1} & \sum_i d_{i,2}^2 & \cdots & \sum_i d_{i,2}d_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_i d_{i,n}d_{i,1} & \sum_i d_{i,n}d_{i,2} & \cdots & \sum_i d_{i,n}^2 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.4.2 Autovalores e Autovetores

Seja uma matriz $\mathbf{M} = \mathbf{D}\mathbf{D}^T$ de ordem m e a matriz identidade \mathbf{I} , um vetor \mathbf{v} não nulo e um escalar λ , os quais são chamados de autovetor e autovalor de \mathbf{M} se obedecerem as seguintes equações, respectivamente:

$$\mathbf{M}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \quad (2.47)$$

$$(\mathbf{M} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{v} = 0 \quad (2.48)$$

Tendo em vista as equações acima, para que a equação não seja trivial, ou seja $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$, tem-se que:

$$P(\lambda) = \det(\mathbf{M} - \lambda\mathbf{I}) = \begin{pmatrix} v_{11} - \lambda & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} - \lambda & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} - \lambda \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

$$P(\lambda) = \det(\mathbf{M} - \lambda\mathbf{I}) \quad (2.50)$$

A função $P(\lambda)$ é conhecido como polinômio característico, cujas raízes são autovalores de \mathbf{M} . Uma vez calculados os autovalores $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, n$ retorna-se para a equação (2.48) e calcula-se o autovetor associado a cada autovalor.

2.4.3 Decomposição em Valores Singulares SVD

A decomposição em valores singulares é uma técnica proveniente da álgebra linear muito importante, uma vez que possibilita a fatoração de matrizes grandes subdividindo-as em um produto de três outras matrizes. Sendo assim, tendo-se uma matriz $\mathbf{D}(m \times n)$, com posto $p \leq \min(m, n)$ pode ser fatorada nas matrizes \mathbf{U} do tipo $m \times m$, \mathbf{V} do tipo $n \times n$ e uma

matriz diagonal Σ , tal como descrito pelas equações e relações abaixo:

$$\mathbf{U} = \mathbf{D}\mathbf{D}^T \quad (2.51)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{D}^T\mathbf{D} \quad (2.52)$$

$$\Sigma = \mathbf{U}^T\mathbf{D}\mathbf{V} \quad (2.53)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (2.54)$$

A matriz Σ tem dimensão $m \times n$ e é dada por:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Essa matriz é uma matriz diagonal, retangular, cujos os elementos da diagonal são não nulos chamados de valores singulares de \mathbf{D} . Além disso, cada valor singular é obtido do autovalor correspondente, de modo que $\lambda_i = \sigma_i^2$. A técnica SVD quando utilizada como um filtro bidimensional de coerência, é mais útil que \mathbf{D} seja definida de uma forma equivalente como uma soma de matrizes de posto unitário, ponderadas pelos valores singulares (Ladino, 2011).

$$\mathbf{D} = \sum_{i=1}^P \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (2.56)$$

onde \mathbf{u}_i é o i -ésimo autovetor de $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$, \mathbf{v}_i é o i -ésimo autovetor de $\mathbf{D}^T\mathbf{D}$ e o σ_i é o i -ésimo valor singular de \mathbf{D} . Cada i -ésima parcela de \mathbf{D} é denominada de autoimagem.

Sabe-se que cada autoimagem contém uma parcela de informação do dado sísmico a qual pode ser medida através da magnitude do autovalor correspondente. As autoimagens associadas aos maiores autovalores são portadoras da maior parte de informação correlacionável presente na matriz de dados sísmicos (Freire, 1986).

2.4.4 Filtragem SVD no Domínio do Tempo

Considerando uma seção sísmica 2D seleciona-se um subconjunto M de traços sísmicos, na qual ocorrerá a aplicação do método SVD como um tipo de filtragem. Tem se que $d(t, x_n)$, $t = 1, \dots, M$ e $n = 1, \dots, N$. Como já foi descrito acima o método de filtragem SVD consiste em poder decompor a matriz de dados $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1 \dots \mathbf{d}_N] = \{d(t, x_1), \dots, d(t, x_N)\}$,

$t = 1, \dots, M$ da seguinte forma:

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (2.57)$$

onde:

- $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \dots, \sigma\}$, é a matriz dos valores singulares ($M \times N$) e $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$;
- $\mathbf{U} = \mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_N$, é a matriz dos autovetores ($M \times M$) associada à dimensão do tempo;
- $\mathbf{V} = \mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_N$, é a matriz dos autovetores ($N \times N$) associada à dimensão do espaço.

Calcula-se então os valores singulares dessa submatriz, cuja soma ponderada, por cada autovetor associado deverá reguardar as informações mais representativas do dado sísmico como um todo (Lima, 2014). A equação da Decomposição em Valores Singulares pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_1 & \cdots & \sigma_N \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_N^T \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 & \cdots & \mathbf{d}_j & \cdots & \mathbf{d}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_1 & \cdots & \sigma_N \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1,1} & \cdots & v_{1,j} & \cdots & v_{1,N} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ v_{N,1} & \cdots & v_{N,j} & \cdots & v_{N,N} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Com base na equação (2.59), se tomarmos um traço sísmico \mathbf{d}_j como sendo o somatório de autoimagens, teremos:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_j &= \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_1 & \cdots & \sigma_N \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1,j} \\ \vdots \\ v_{N,j} \end{bmatrix} \\ &= \tilde{d}_{j1} + \dots + \tilde{d}_{jk} + \dots + \tilde{d}_{jN} = \sum_{k=1}^N \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_{kj}. \end{aligned} \quad (2.60)$$

A equação (2.60) resume a decomposição SVD uma vez que mostra que o traço sísmico \mathbf{d}_j pode ser obtido como uma combinação linear da soma de autovetores associados à dimensão do tempo ponderada pelos autovetores associados à dimensão espacial e escalonada pelos respectivos valores singulares. Sendo assim, podemos voltar a equação (2.58) e representar a matriz de dados sísmicos da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \cdots & \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \sigma_N \mathbf{v}_N^T \end{bmatrix} \\
&= \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T + \dots + \sigma_N \mathbf{u}_N \mathbf{v}_N^T \\
&= \tilde{\mathbf{D}}_1 + \tilde{\mathbf{D}}_k + \dots + \tilde{\mathbf{U}}_N = \sum_{k=1}^N \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T
\end{aligned} \tag{2.61}$$

$\tilde{\mathbf{D}}_k = \sum_{k=1}^N \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$ é uma matriz de posto unitário, a qual é chamada de autoimagem k da matriz de dados \mathbf{D} , enquanto que $\tilde{\mathbf{d}}_{jk}$ é o traço j da matriz $\tilde{\mathbf{D}}_k$. Sendo assim, sabe-se que a matriz de dados sísmicos pode ser reconstituída total ou parcialmente pelo somatório de suas autoimagens.

Os primeiros autovalores são os que possuem uma maior amplitude e as primeiras autoimagens guardam as informações que representam as feições de maior correlação espacial, tal como as reflexões (Freire, 1986). Portanto, é possível reconstituir eventos predominantemente horizontais e sub-horizontais como foi feito por Porsani et al., (2009) e Ladino, (2011) afim de atenuar eventos inclinados relacionados ao *ground-roll*.

A filtragem SVD é realizada tomando-se um subconjunto L de traços sísmicos vizinhos, efetua-se a decomposição SVD da matriz de dados equivalente e restitui-se apenas parcialmente o traço resultante $\tilde{\mathbf{d}}_j$, como mostra a equação (2.62).

$$\tilde{\mathbf{D}}(t, x_j) = \sum_{k=1}^N \sigma_k \mathbf{u}_k(t) \mathbf{v}_k(x_j) \tag{2.62}$$

Sendo assim, a filtragem SVD no domínio do tempo nesse trabalho consiste em aplicar a filtragem SVD no dado sísmico de tal forma que o dado filtrado $\tilde{\mathbf{d}}(t, x_j)$ será obtido a partir dos K primeiros autovetores. Se adotarmos valores pequenos de K , a seção sísmica resultante possuirá maior coerência espacial, uma vez que os eventos horizontais, sub-horizontais e correlacionáveis foram preservados.

A filtragem SVD pode ser vista como um método de filtragem multicanal onde cada traço filtrado guarda certo grau de coerência com os traços imediatamente vizinhos (Ladino, 2011). Portanto esse método constitui-se basicamente dos procedimentos abaixo:

1) Leitura do dado sísmico de entrada e consecutiva seleção de subconjunto M de traços imediatamente vizinhos a cada traço $\tilde{\mathbf{d}}(t, x_j)$.

2) Decomposição SVD.

3) Reconstituição parcial dado original, utilizando apenas as primeiras autoimagens.

O parâmetro que define a filtragem SVD no domínio do tempo é basicamente o tamanho da janela adotada, a qual foi definida nesse trabalho como sendo uma janela retangular contendo 5 traços por 50 amostras. O tamanho da janela foi definido através de vários testes que resultaram na definição do parâmetro ótimo para o dado utilizado.

2.4.5 Filtragem SVD no Domínio da Frequência

A filtragem SVD adaptativa no domínio da frequência assim como a a filtragem no domínio do tempo consiste em reconstituir o tiro central coletado dentro de um subconjunto de M de traços através da primeira autoimagem que está diretamente relacionada com as informações relevantes do dado sísmico, ou seja, as reflexões de interesse. Por atuar no domínio da frequência a técnica SVD_{Df} pode ser aplicada a uma faixa de frequência do dado na qual estão concentradas o ruído que se deseja atenuar, sendo assim a filtragem é realizada através da diferença entre o espectro original e o espectro calculado pelo SVD.

Inicialmente, para que a decomposição SVD seja feita no domínio da frequência faz-se necessário levar o dado para esse domínio através da transformada rápida de Fourier (FFT). Uma vez nesse domínio, a filtragem SVD é realizada obtendo como resultado o espectro predito que será subtraído do espectro original do dado. Finalmente, retornamos para o domínio do tempo através da transformada inversa de Fourier (FFT).

O programa em Fortran utilizado tem como parâmetros para a filtragem SVD_{Df} : o tamanho de janela com L traços, o número de refinamento (N_{ref}) que representa o número de vezes que será realizada a diferença entre o espectro original e o predito, e a faixa de frequência na qual o método deve atuar. Com isso, espera-se que o resultado obtido possua o conteúdo de frequência mais representativo da faixa escolhida, sendo assim uma vez feita a diferença entre os espectros original e resultante teremos o dado filtrado.

A aplicação dessa filtragem adaptativa SVD_{Df} para atenuação do *ground roll* é feita a partir da frequência média na qual esse ruído costuma aparecer e percorre-se todo o espectro de frequência do dado, fazendo com que a atenuação do ruído não resulte em passagens descontínuas entre o intervalo filtrado e aquele fora da banda de atenuação do dado (Lima, 2014).

2.4.6 Etapas do Algoritmo SVD_{Df}

O algoritmo utilizado nesse trabalho foi desenvolvido por Lima e Porsani (2014).

DO $j = 1, nt$ (nt=número de traços)

- Leitura do traço de entrada $\rightarrow x_i$
- Calculo o traço complexo com parte imaginária nulo $\rightarrow cx_i$
- Aplica FFT ao $cx_i \rightarrow xf_i$ (traço no domínio da frequência)
- Seleciona a parte real $\rightarrow xf_i$

ENDDO

- Monta a matriz X_f
- Calcula a transposta de $X_f \rightarrow X_f^T$
- Seleciona a janela móvel $\rightarrow j = \frac{(L+1)}{2}$

DO $i = 1, Nref$

DO $j = f1, f2$ (f1,f2 representam a faixa de frequência)

- Monta a matriz Y_f

ENDDO

- Decomposição SVD $Y_f \rightarrow Z_f$
- Calcula os elementos $\rightarrow z_{fj} = z_{fj} - u\sigma v$
- Atualiza Z_f
- Armazena a matriz filtrada em Z_f
- Aplica FFTI aos elementos da matriz Z_f
- Seleciona a parte real dos elementos de Z

ENDDO

- Dado filtrado $\rightarrow X_{svd} = real(Z)$

CAPÍTULO 3

Resultados

Com o objetivo de compararmos a eficiência de diversas técnicas na atenuação do *ground-roll* foi realizado o processamento de uma linha sísmica da Bacia do Tacutu. Os parâmetros de aquisição estão apresentados na tabela abaixo:

| Fluxograma de Processamento | |
|------------------------------------|---------------------|
| Linha | 204-RL-247 |
| Lanço | 3850-100-0-100-1050 |
| t(s) | 4 |
| $\Delta t(ms)$ | 4 |
| GC(%) | 4800 |
| $\Delta s(m)$ | 50 |
| $\Delta g(m)$ | 50 |
| Nc | 96 |

Table 3.1: Parâmetros de aquisição da linha 204-RL-247 da Bacia do Tacutu.

Os métodos foram desenvolvidos em linguagem de programação FORTRAN. O *software* de processamento sísmico utilizado foi o *Seismic Unix* desenvolvido pelo *Center for Wave Phenomena-Colorado School of Mines*. No entanto, as etapas iniciais do processamento, também chamado de pré-processamento, foram realizadas utilizando a plataforma GêBr que também é de livre distribuição e possui uma interface bastante amigável.

Os resultados obtidos serão mostrados sempre comparando as características da seção sísmica bruta, com as características da seção obtida após a aplicação de cada um dos métodos de filtragem abordados nesse trabalho. Para evidenciar ainda mais as melhorias ou não obtidas pelas técnicas de filtragem, será apresentada não só a seção empilhada mas também o próprio dado após a aplicação dos métodos, plotagem dos espectros de amplitude e os efeitos causados nos espectros de velocidades.

3.1 Fluxograma Adotado

Vários fatores influenciam na escolha do fluxograma a ser adotado entre elas estão: o tempo e recursos disponíveis, softwares utilizados e o nível de resolução que se deseja alcançar. No entanto, o principal fator determinante é o tipo de dado que será utilizado, o que influenciará diretamente nas etapas de processamento a serem adotadas. A Figura 3.1 mostra o fluxograma adotado para o presente trabalho.

Tendo em vista, que esse trabalho visou testar e comparar a eficiência das seguintes técnicas na atenuação do *ground-roll*: Filtragem SVD no domínio tx , Filtragem SVD no domínio fx , Deconvolução no domínio fx e finalmente a combinação da deconvolução Wiener-Levinson e a filtragem SVD no domínio tx . Algumas outras etapas que são conhecidas como fundamentais na obtenção de uma alta resolução temporal e espacial não foram realizadas, tais como: migração e correção estática.

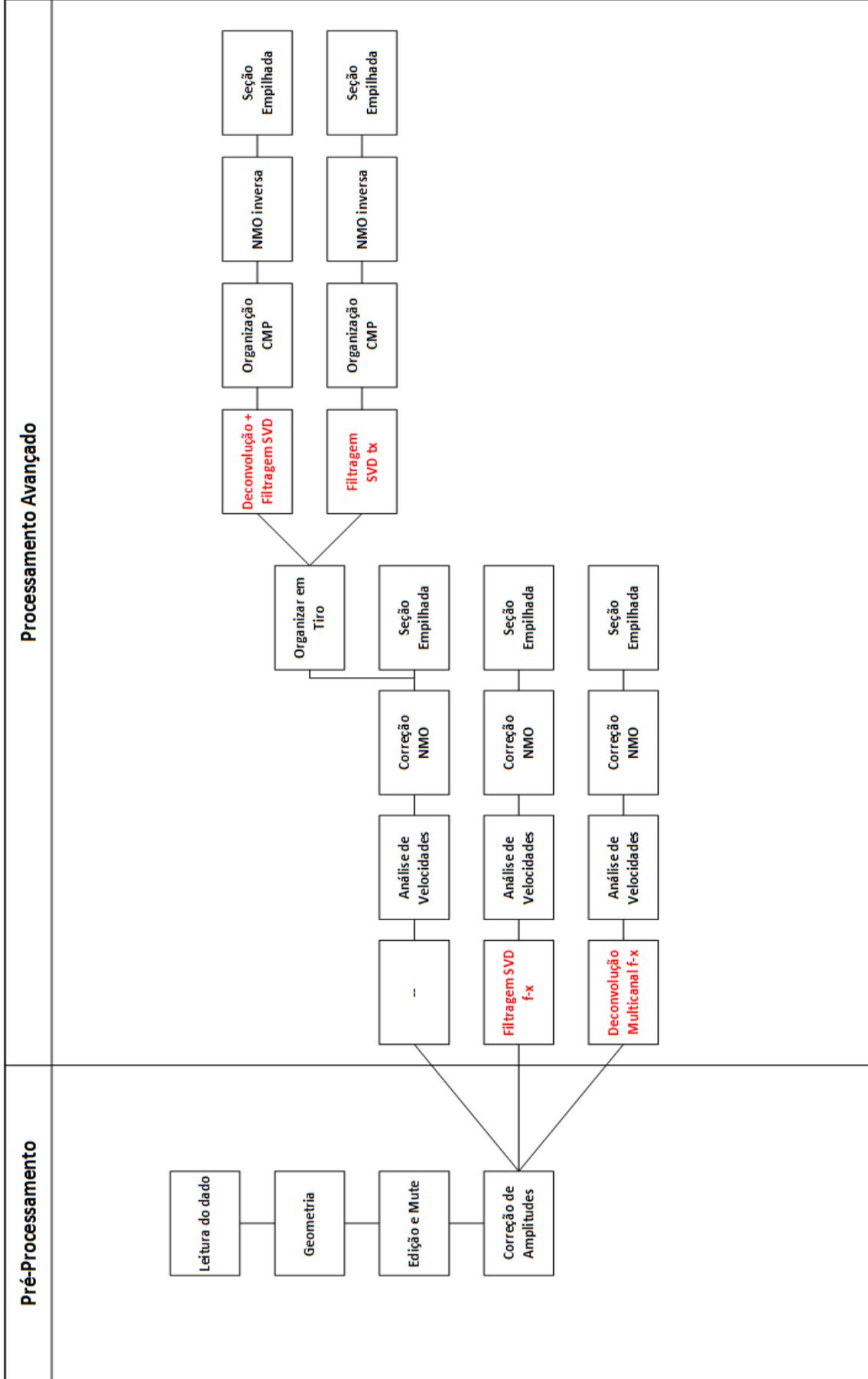


Figure 3.1: Fluxograma de processamento adotado.

3.2 Comparação de Dados

Com o intuito de testar os diferentes métodos de filtragem apresentados nesse trabalho, separamos o tiro 334 da linha 204-RL-247 da Bacia do Tacutu, pois esse tiro apresenta um ruído *ground-roll* bem definido assim como algumas reflexões, tornando-se assim uma boa amostra do dado sísmico como um todo. Todas as figuras mostram a comparação entre o tiro original 334 e o tiro após a aplicação de cada uma dos métodos abordados nesse trabalho.

A filtragem adaptativa SVD no domínio do tempo requer que o dado esteja corrigido de NMO no domínio do tiro comum, tendo como finalidade deixar as reflexões de interesse aproximadamente horizontais (Ladino, 2011). Após alguns testes, definiu-se que o melhor operador para essa filtragem foi uma janela de 5 traços por 50 amostras. Portanto, a Figura 3.2 apresenta, a comparação entre tiro 334 corrigido de NMO e o mesmo tiro após a aplicação da filtragem SVD no domínio do tempo. Percebe-se que a atenuação do *ground-roll* não foi muito efetiva para esse dado, no entanto esse método melhorou a coerência das reflexões.

A Figura 3.3 apresenta a comparação entre o tiro 334 e o resultado obtido após a aplicação da filtragem SVD_{df} , que foi obtido utilizando os seguintes parâmetros: $L=6$ (tamanho da janela), $N=13$ (número de refinamento). Percebe-se que o método foi aparentemente eficiente na atenuação do *ground-roll*, tomando esse tiro como referência.

A deconvolução no domínio da frequência teve os seguintes parâmetros definidos na fase de teste dos programas: $ncf=1$ (número de coeficientes do filtro), $L=1$ (distância de predição em número de amostras) e $nc=5$ (números de traços para deconvolver 1). O resultado da deconvolução no domínio da frequência foi semelhante ao resultado obtido com a filtragem SVD_{df} , como podemos observar na Figura 3.4. No entanto, percebe-se a criação de alguns ruídos aleatórios no dado, que ocorre como consequência da mudança de domínio do tempo para frequência e para trazê-lo de volta para o domínio do tempo.

Afim de obter um resultado melhor que resultasse na atenuação do *ground-roll*, aumento da resolução temporal e razão sinal/ruído, nós combinamos a aplicação de uma deconvolução Wiener-Levinson traço a traço com a Filtragem SVD no domínio do tempo. Os parâmetros da Filtragem SVD foram os mesmos acima e utilizamos $nc=1$ para a deconvolução. A comparação entre os tiros original corrigido de NMO e resultante são mostrado na Figura 3.5.

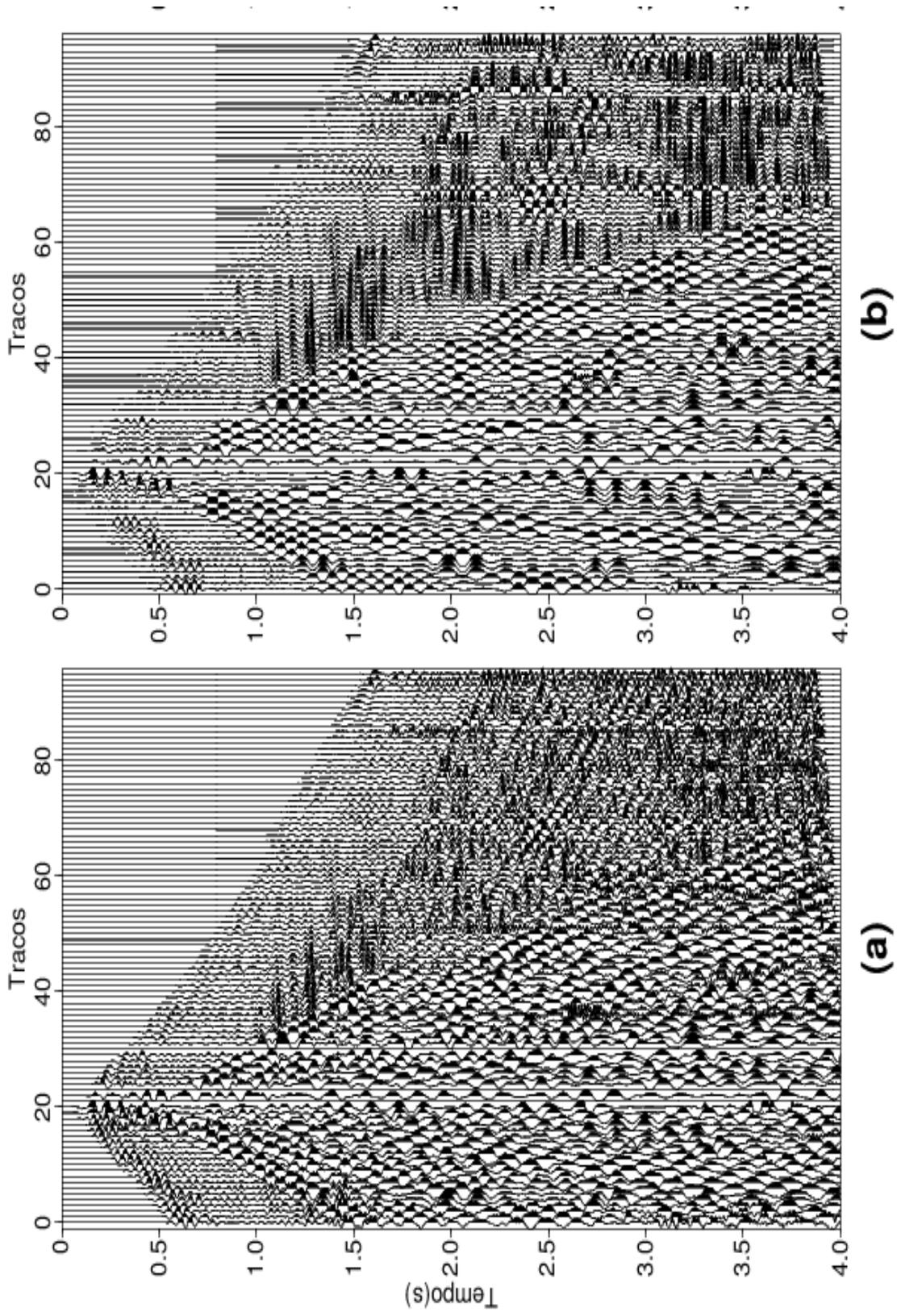


Figure 3.2: Filtragem SVD no domínio do tempo do tiro 334. Dados do tiro original corrigido de NMO em (a), Dados do tiro filtrado com SVD no domínio do tempo em (b).

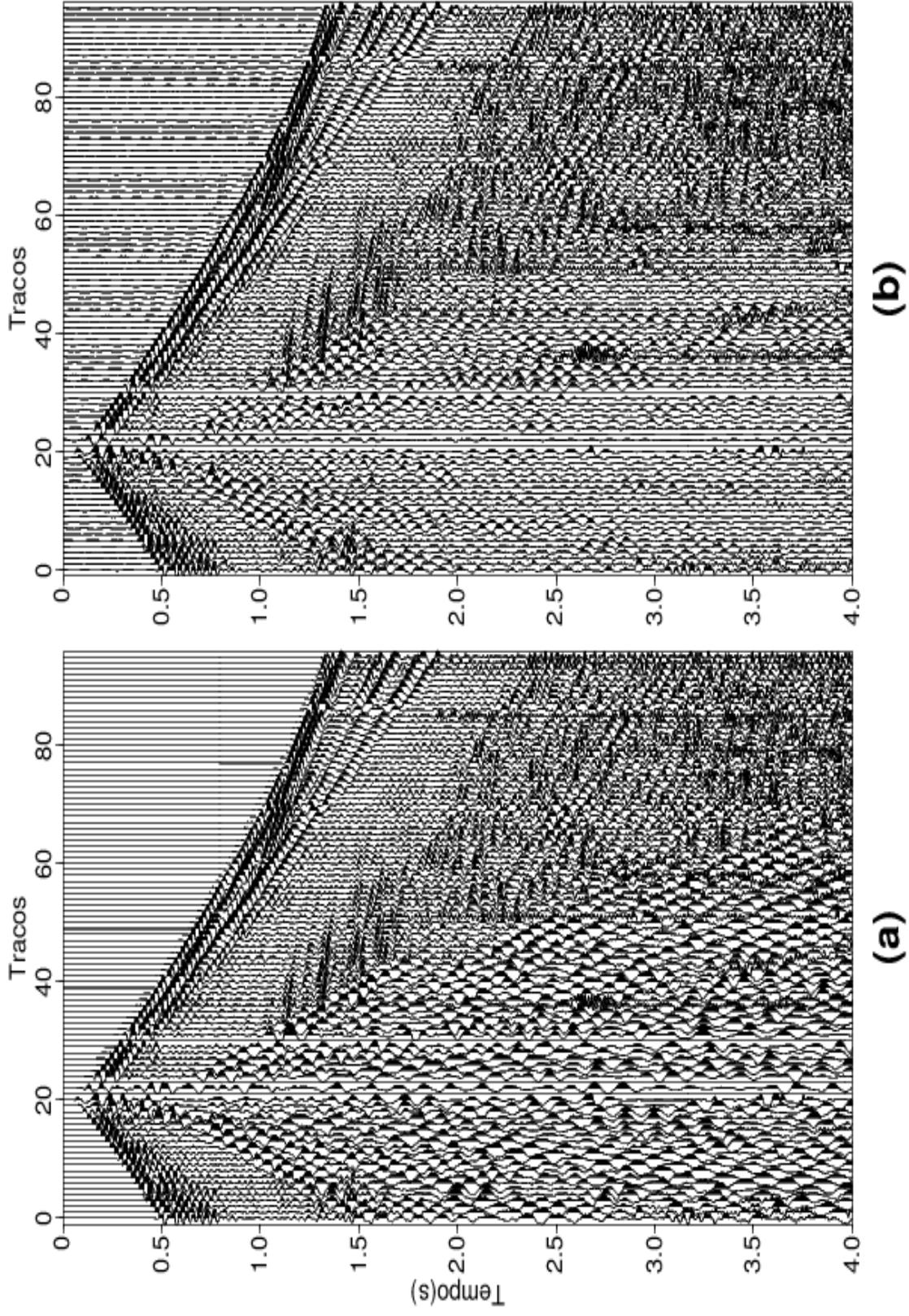


Figure 3.3: Filtragem SVD no domínio da frequência do tiro 334. Dados do tiro original em (a), Dados do tiro filtrado com SVD no domínio da frequência em (b).

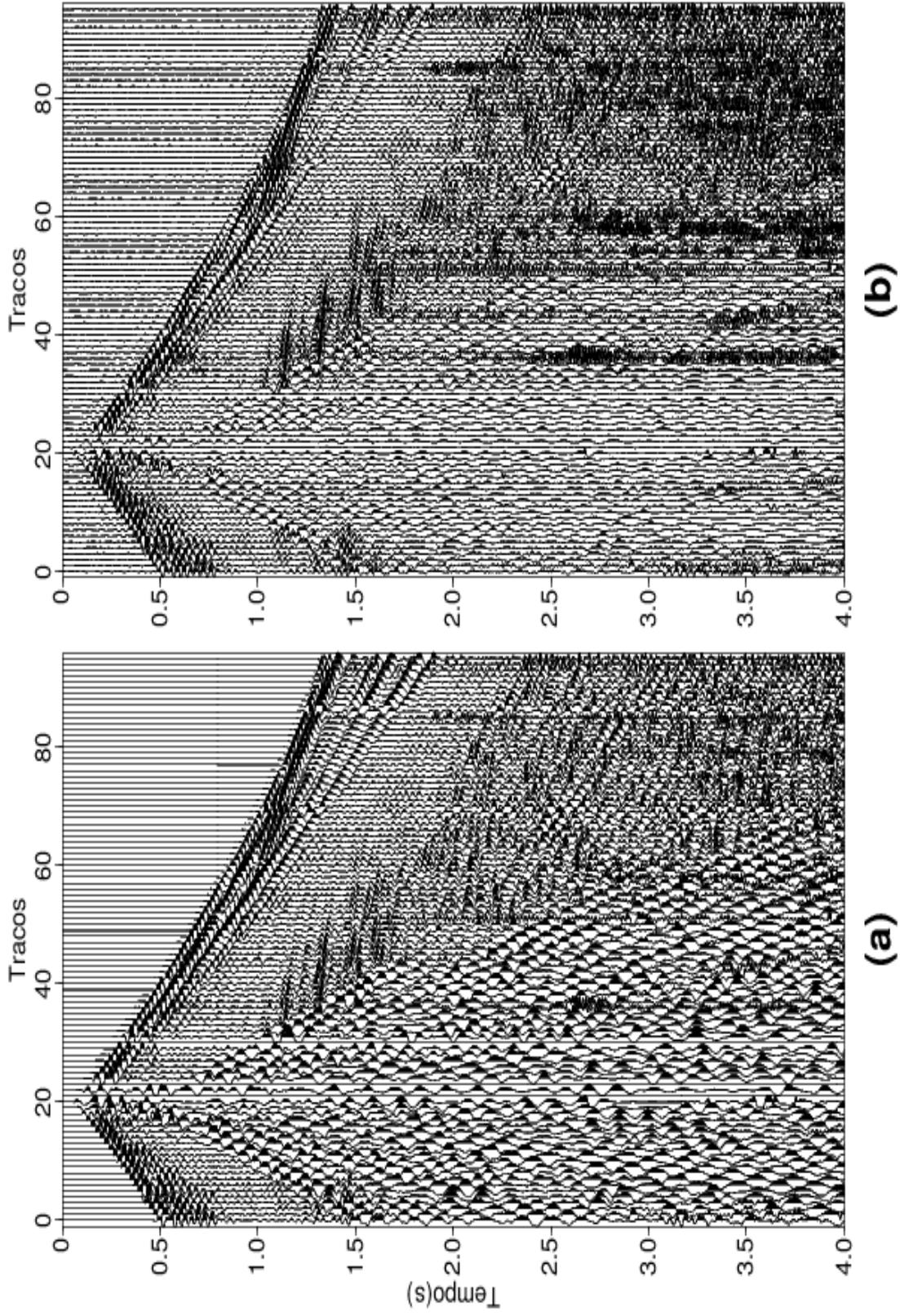


Figure 3.4: Deconvolução no domínio da frequência do tiro 334. Dados do tiro original em (a), Dados do tiro filtrado com deconvolução no domínio da frequência em (b).

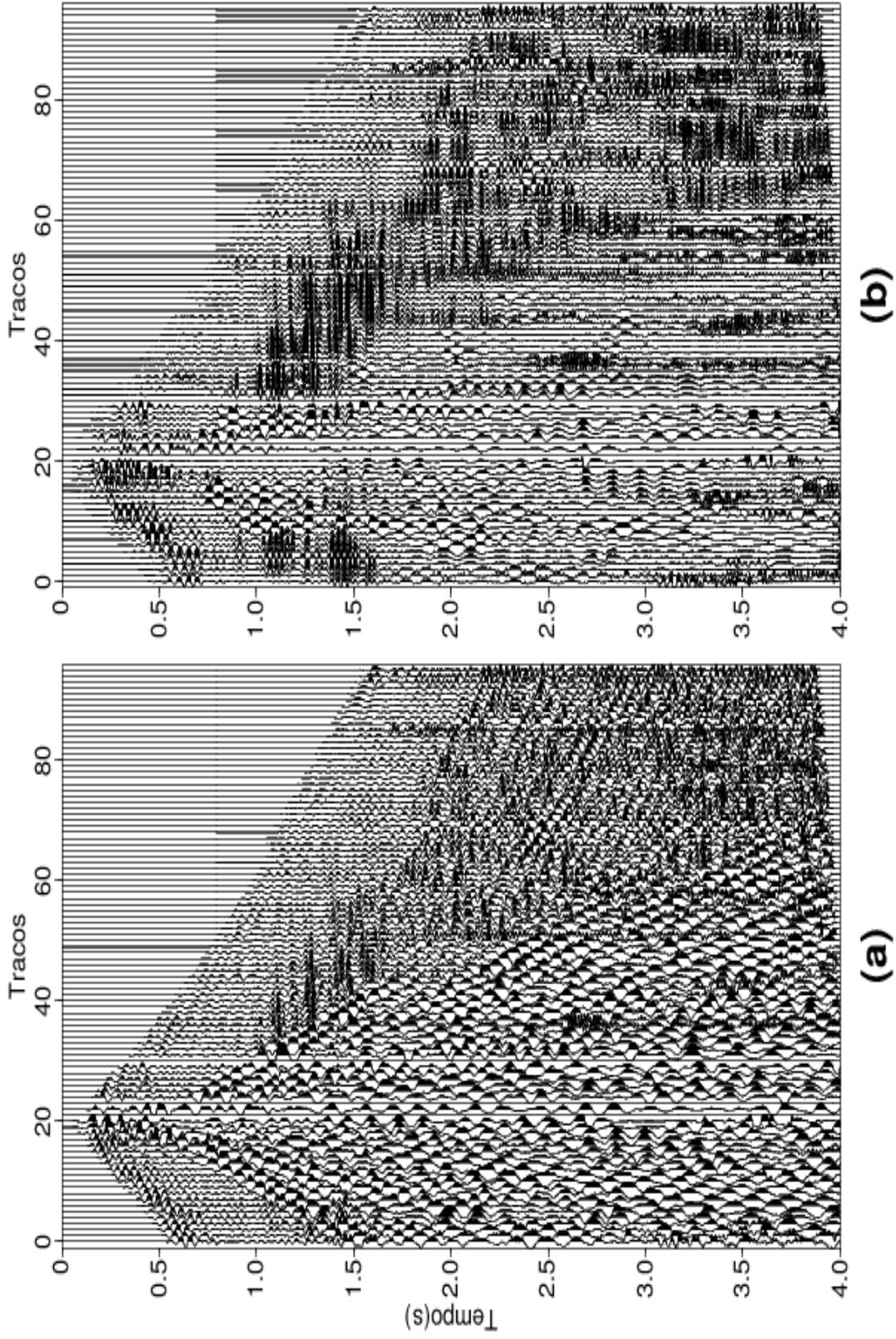


Figure 3.5: Dados do tiro 334 original corrigido de NMO em (a), Dados do tiro após aplicação de deconvolução e filtragem SVD no domínio do tempo em (b).

3.3 Espectro de Amplitudes

O espectro de amplitudes do dado antes e após a aplicação dos diferentes métodos de filtragem é também um resultado interessante para se analisar. Sabendo-se que o ruído *ground-roll* atua numa de banda de frequências entre 5 Hz a 15 Hz (Yilmaz, 2001), podemos notar nas Figuras 3.6 e 3.7 que o ruído foi mais suprimido por algumas técnicas do que por outras, no entanto houve de forma geral uma diminuição nas amplitudes do dado localizado nesse *range* de frequências.

Algumas técnicas convencionais como filtragem F-K e passa banda, realizam um corte cirúrgico na banda de frequências em que o *ground-roll* predomina. No entanto, esse processo deve ser evitado, pois junto com o *ground-roll* algumas informações das reflexões também podem ser eliminadas. Por isso que a atenuação é sempre a melhor abordagem a ser utilizada em comparação com o corte completo de uma banda de frequências.

Analisando os espectros de amplitudes gerados, tanto a deconvolução no domínio da frequência quanto para a deconvolução e filtragem no domínio do tempo, percebe-se que houve um significativo realce nas informações contidas na banda de frequências acima de 20 Hz em relação ao dado original. Em contrapartida, notamos que o espectro de amplitudes do dado filtrado com SVD no domínio do tempo apresenta praticamente o mesmo espectro do dado original, no entanto apesar de não ter sido efetivo na atenuação do *ground-roll*, como os outros métodos foram, ele melhorou a coerência das reflexões como poderemos observar na próxima seção.

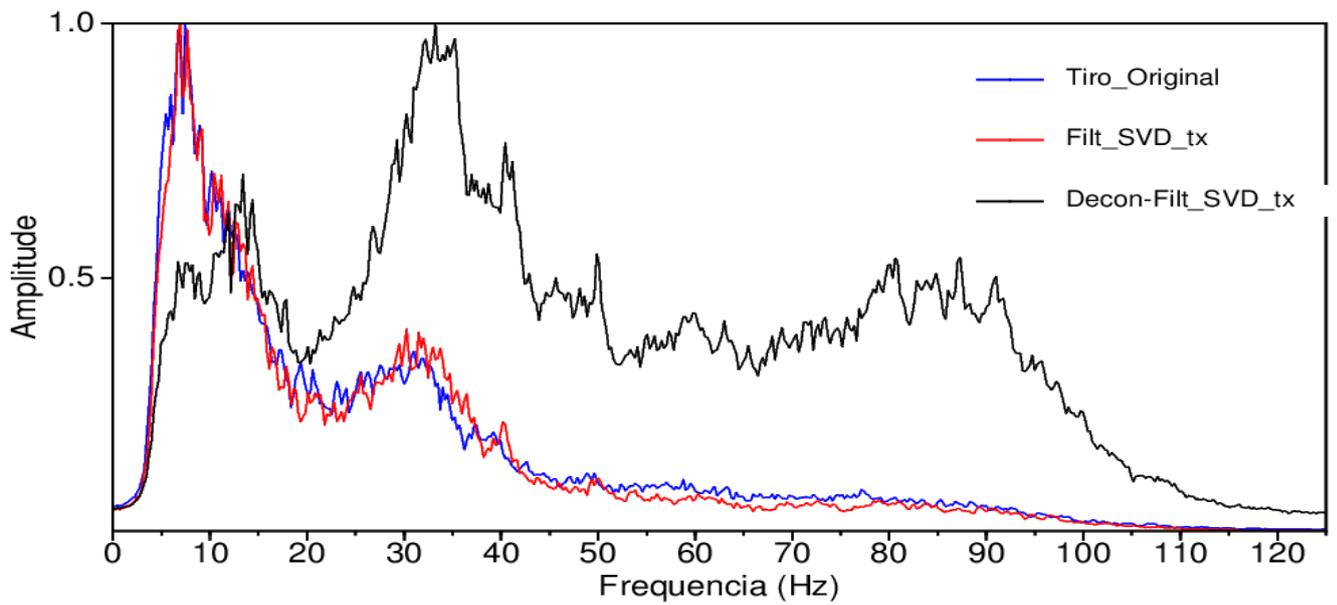


Figure 3.6: Comparação dos espectro de amplitudes do tiro 334 original e após aplicação das filtragens SVD no domínio do tempo e deconvolução + filtragem SVD.

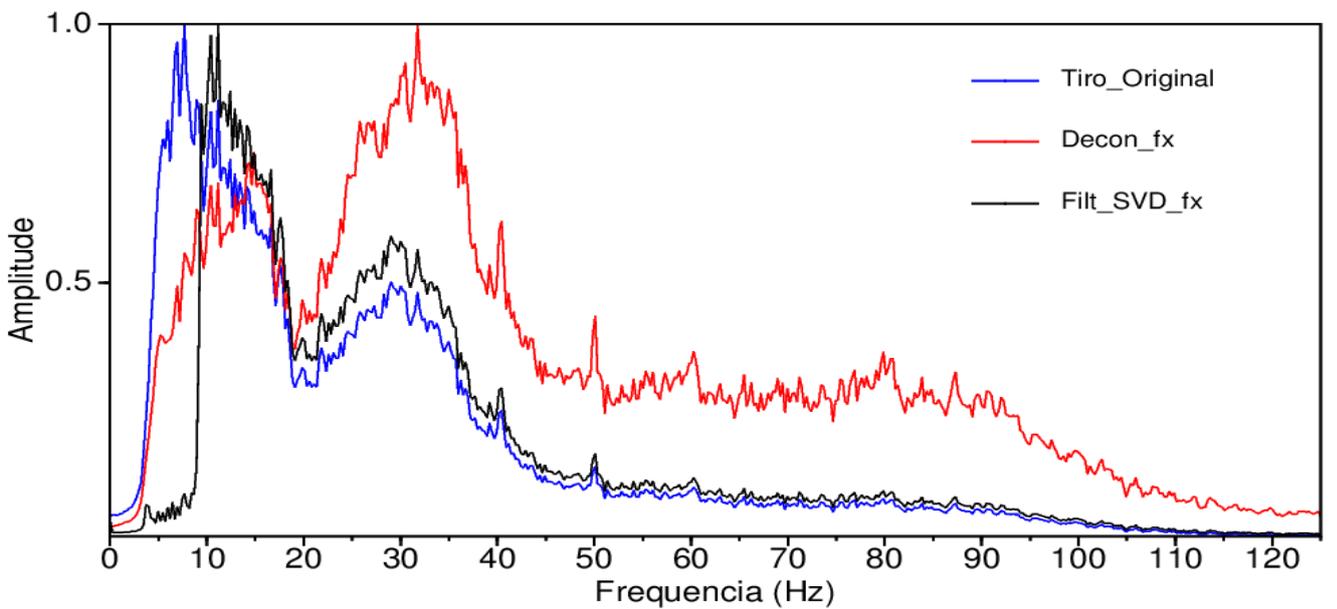


Figure 3.7: Comparação dos espectro de amplitudes do tiro 334 original e após aplicação das filtragens SVD e deconvolução ambas no domínio da frequência.

3.4 Influência das Filtragens no Espectro de Velocidades

A etapa de análise de velocidades é uma das mais importantes do processamento sísmico, uma vez que o campo de velocidades gerado será crucial nas etapas subsequentes como a migração e empilhamento. Sabendo-se que a linha terrestre 204-RL-247 da Bacia do Tacutu possui baixa cobertura de refletores, foram gerados *supergathers* com o auxílio de *shell scripts*. Sendo assim, foram gerados painéis de *semblance* com o intuito de verificar a influência das técnicas de filtragem no processo de *picks* de velocidade.

Se a razão sinal/ruído é baixa os espectros de velocidades tendem a apresentar poucos pontos de coerência, prejudicando assim a análise de velocidade, pois fica difícil determinar o valor de velocidade que melhor corrige de NMO o dado. Contudo, a aplicação de métodos de filtragem pode melhorar consideravelmente os painéis de *semblance*, aumentando a coerência. Esse realce ocorre, pois os ruídos que mascaram as reflexões, são atenuados após a filtragem.

Com o objetivo de avaliar a otimização da análise de velocidade por meio dos diversos métodos de filtragem, foi realizada primeiramente a análise de velocidade do dado sísmico sem aplicação de nenhum método de filtragem, e com o campo de velocidades resultantes corrigimos o dado bruto de NMO e empilhamos, gerando a seção sísmica bruta. Em seguida, foram aplicados os métodos de filtragem seguindo o fluxograma apresentado na Figura 3.1. Para cada um dos métodos repetiu-se a análise de velocidades.

Nas figuras 3.8 a 3.11 são exibidas a relação entre o espectro de velocidades e o *supergather* do CMP212 para: dado original, dado filtrado com SVD no domínio tx , dado filtrado com SVD no domínio fx , dado deconvolvido no domínio da fx , respectivamente. E por fim, exibimos o espectro de velocidades resultante da combinação da deconvolução WL com a filtragem SVD no domínio tx , apresentada na figura 3.12.

Comparando os resultados obtidos, percebe-se nitidamente que os métodos no domínio da frequência apresentaram uma melhoria muito pequena na coerência do espectro de velocidades, enquanto que a filtragem SVD no domínio do tempo atrelado a deconvolução resultou na melhor definição e continuidade das reflexões antes mascaradas pelo *ground-roll*. Resultando, numa maior precisão nos *picks* de velocidade.

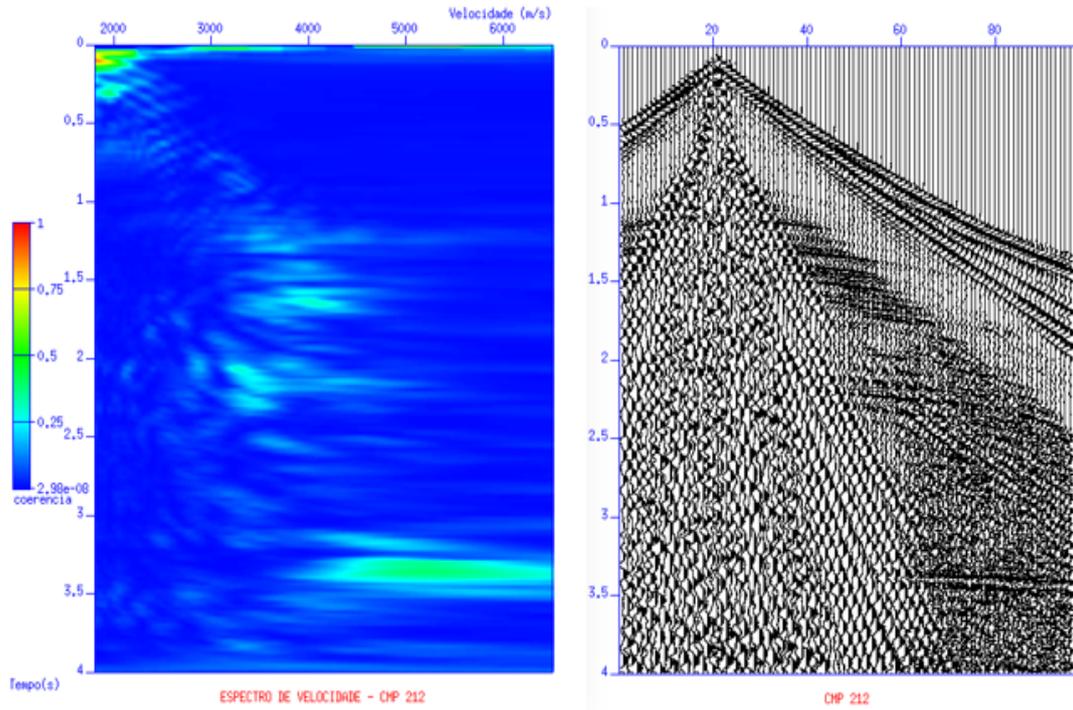


Figure 3.8: Espectro de velocidades do dado original.

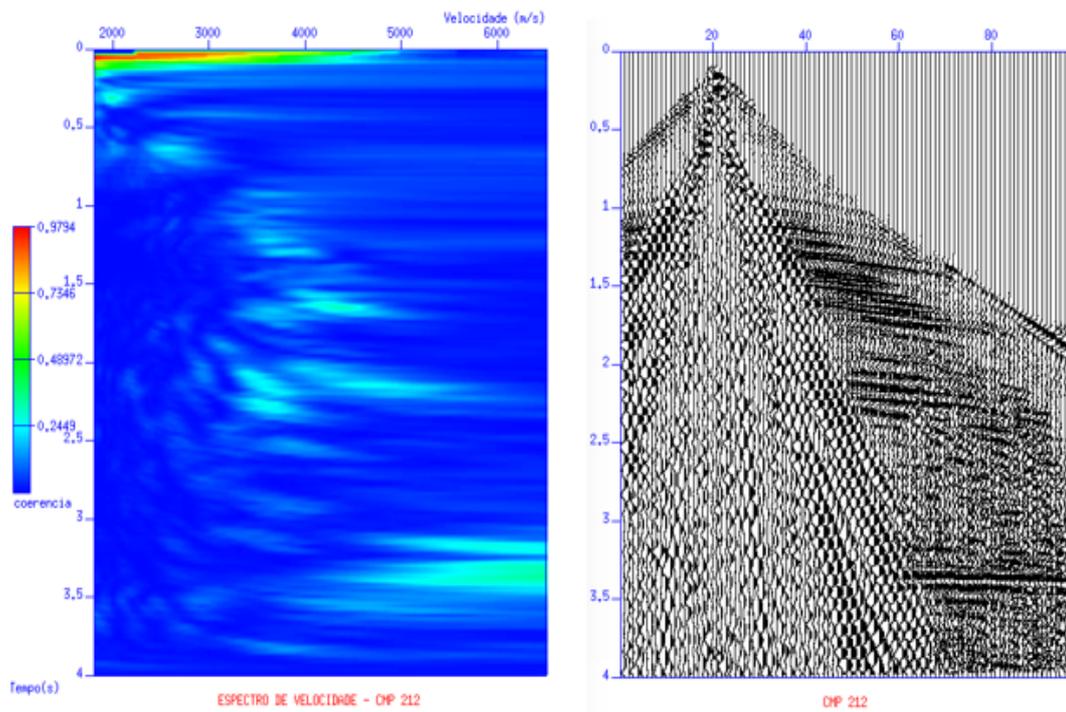


Figure 3.9: Espectro de velocidades do dado filtrado com SVD no domínio do tempo

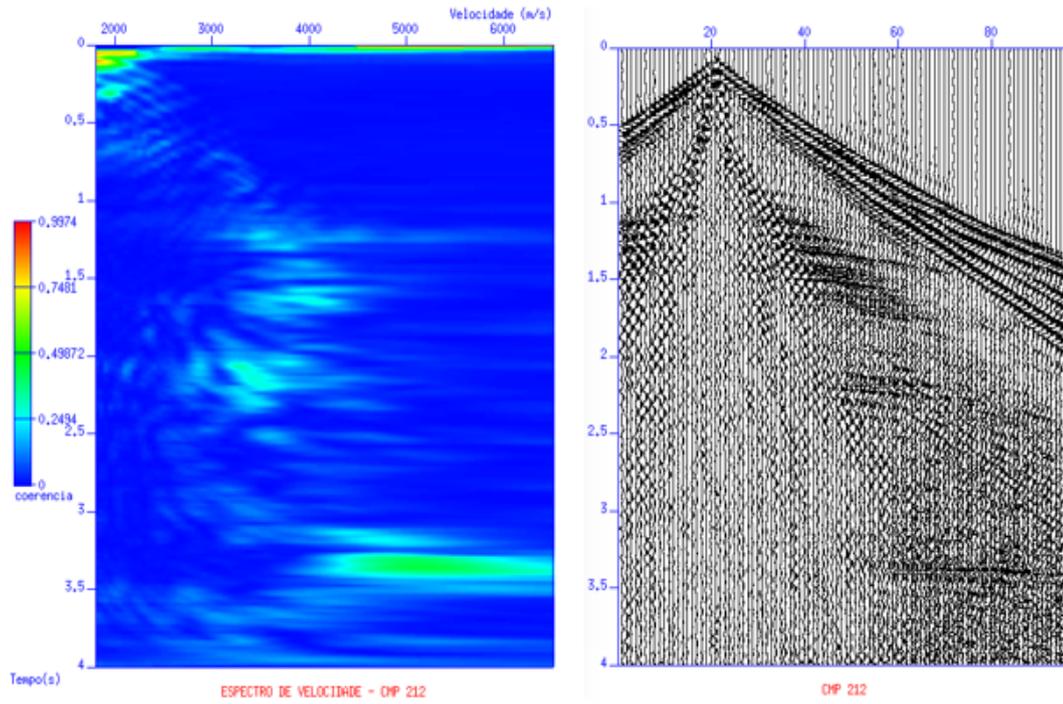


Figure 3.10: Espectro de velocidades do dado filtrado com SVD no domínio da frequência

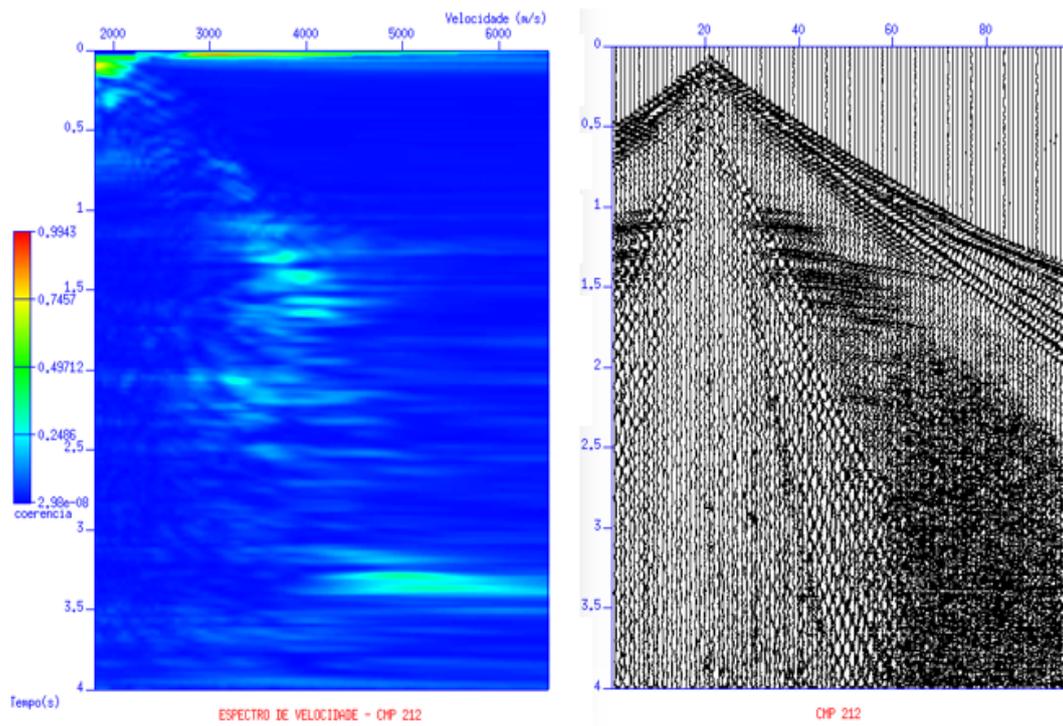


Figure 3.11: Espectro de velocidades do dado filtrado com Deconvolução no domínio da frequência

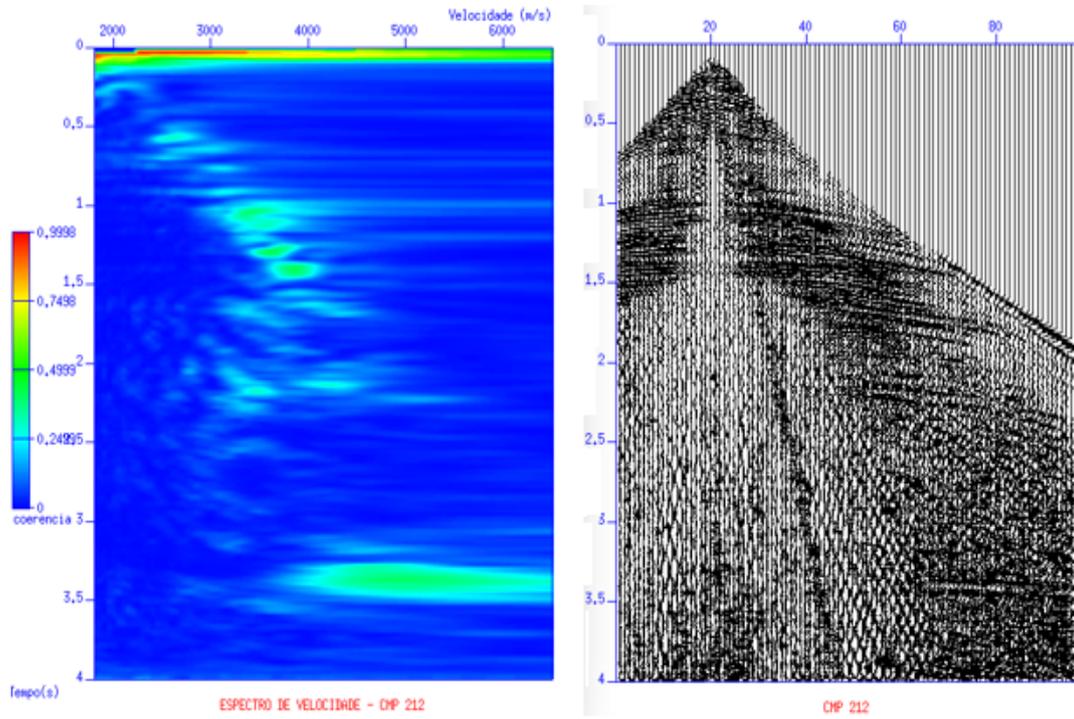


Figure 3.12: Espectro de velocidades do dado filtrado com SVD e deconvolução WL no domínio do tempo

3.5 Seções Empilhadas

As seções sísmicas empilhadas representam, enfim, o resultado final do processamento adotado nesse trabalho. É possível então compara os resultados de toda a teoria explicada ao longo desse trabalho. O mapeamento dos refletores sísmicos pode ser prejudicado pelo *ground-roll*, o qual se manifestar na seção sísmica empilhada na forma de eventos lineares com inclinações para ambos os lados (Silva, 2004).

A Figura 3.13 mostra a seção sísmica original empilhada, também chamada de seção bruta, na qual não foi aplicada qualquer tipo de filtragem. Nota-se que é uma seção com baixa razão sinal/ruído, que embora apresente alguns refletores os mesmos são descontínuos o que torna-se um desafio para o intérprete delinear os refletores e mapear as possíveis estruturas geológicas, que possam indicar zonas de interesse econômico, a exemplo de hidrocarbonetos.

Após a aplicação da filtragem SVD no domínio do tempo, Figura 3.14, percebe-se que houve uma melhora na continuidade dos refletores e o aparecimento de alguns refletores em tempos mais tardios que não apareceram na seção bruta. No entanto, percebe-se que o dado ainda está muito contaminado por ruídos, o que era esperado já que o método não foi totalmente eficiente na atenuação do *ground-roll*.

As seções empilhadas apresentadas nas Figuras 3.15 e 3.16 são referentes a aplicação da filtragem SVD_{df} e deconvolução no domínio da frequência, respectivamente. Nota-se uma melhora em relação a continuidade dos refletores, principalmente na seção deconvolvida, mas ambas ainda apresentam uma grande quantidade de ruídos, os quais podem estar associados ao *ground-roll* e a criação de "artefatos" devido as mudanças de domínio.

Por fim, apresentamos o resultado da combinação da deconvolução Wiener-Levinson com a Filtragem SVD no domínio do tempo, Figura 3.17. Entre todas as técnicas utilizadas nesse trabalho, essa combinação foi a que obteve os melhores resultados, os quais são nítidos na seção empilhada uma vez que o *ground-roll* foi atenuado e a continuidade dos refletores passou a ser mais bem definida, facilitando assim o trabalho do intérprete.

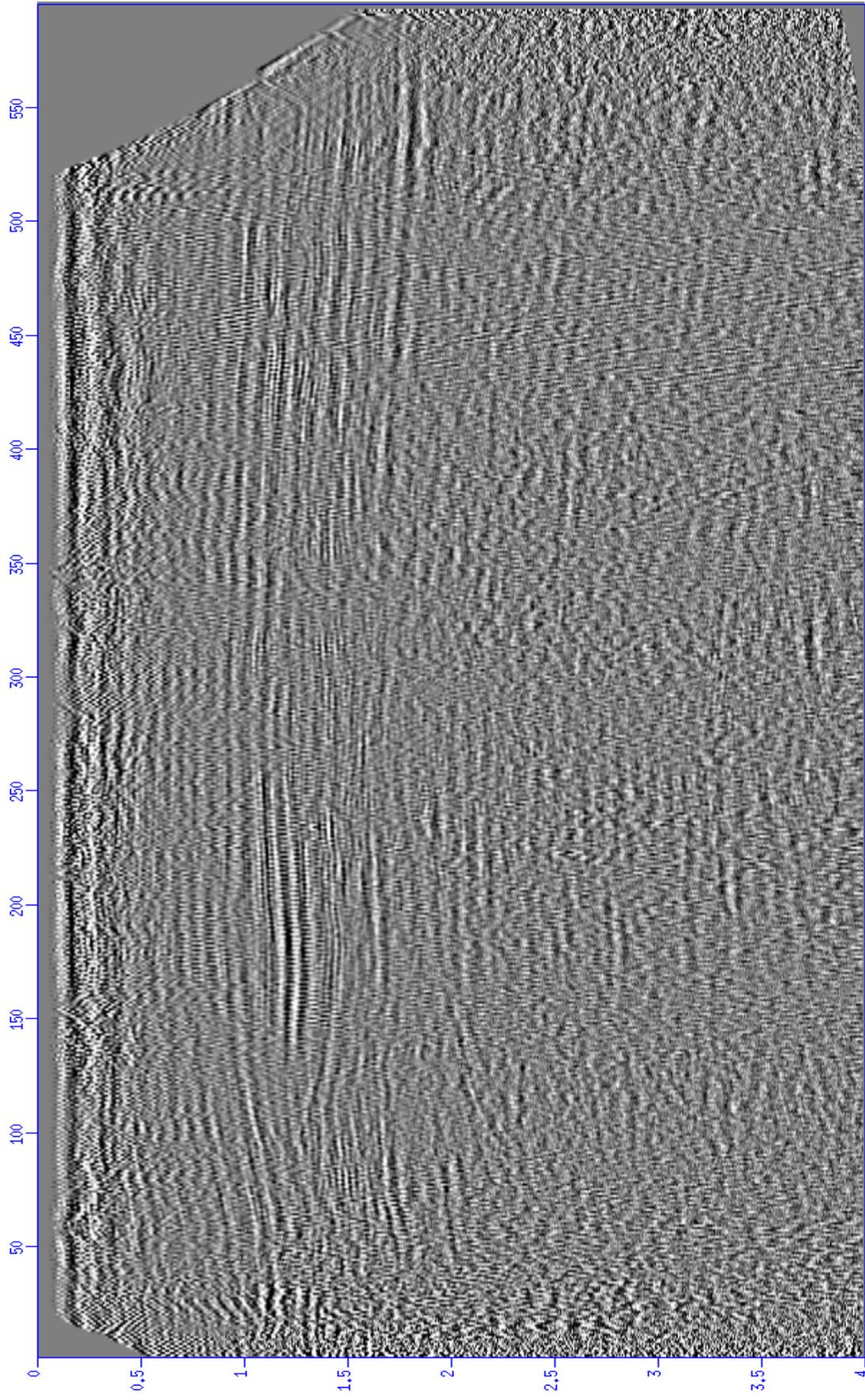


Figure 3.13: Linha sísmica original empilhada.

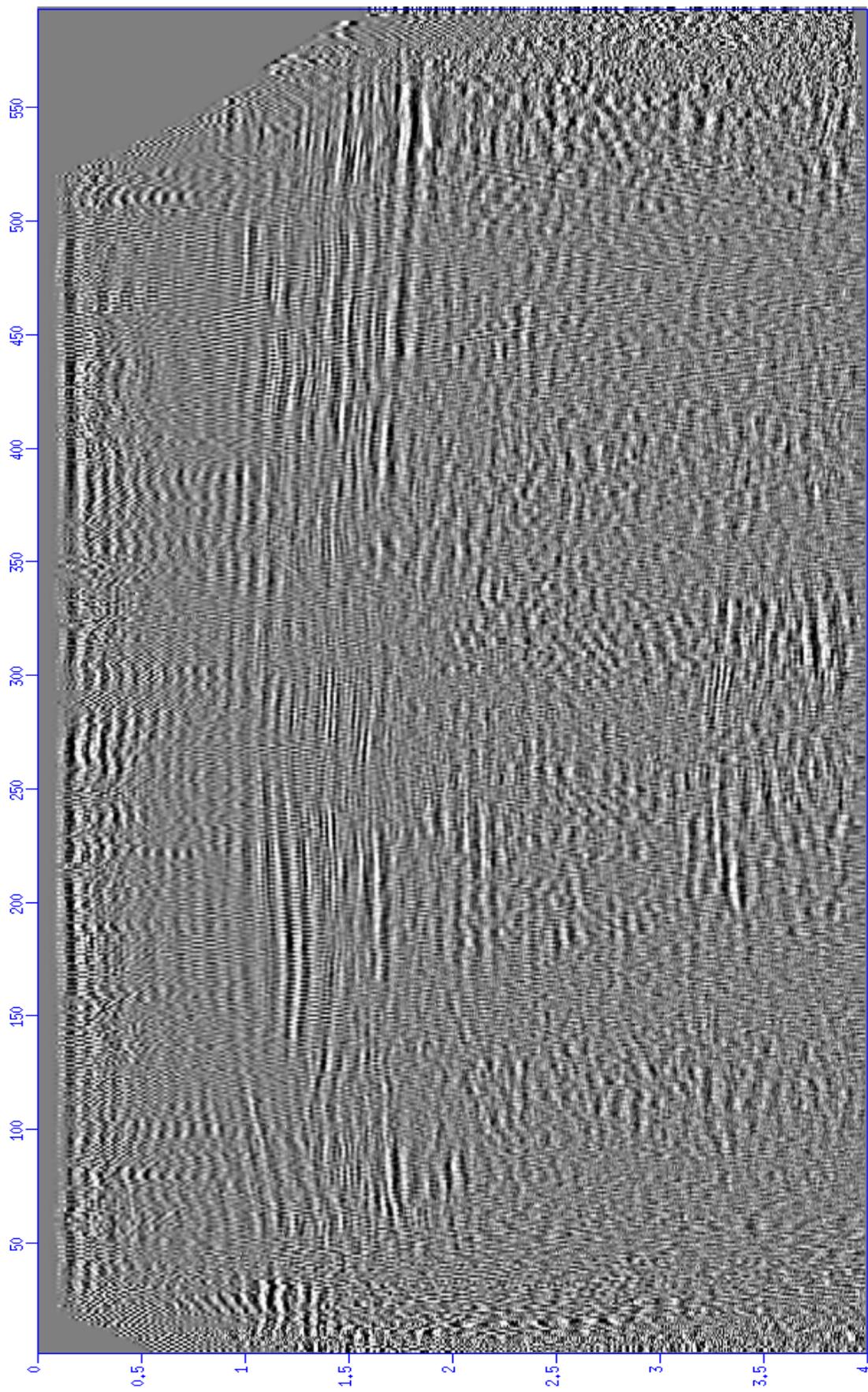


Figure 3.14: Linha sísmica empilhada após aplicar filtragem SVD no domínio do tempo.

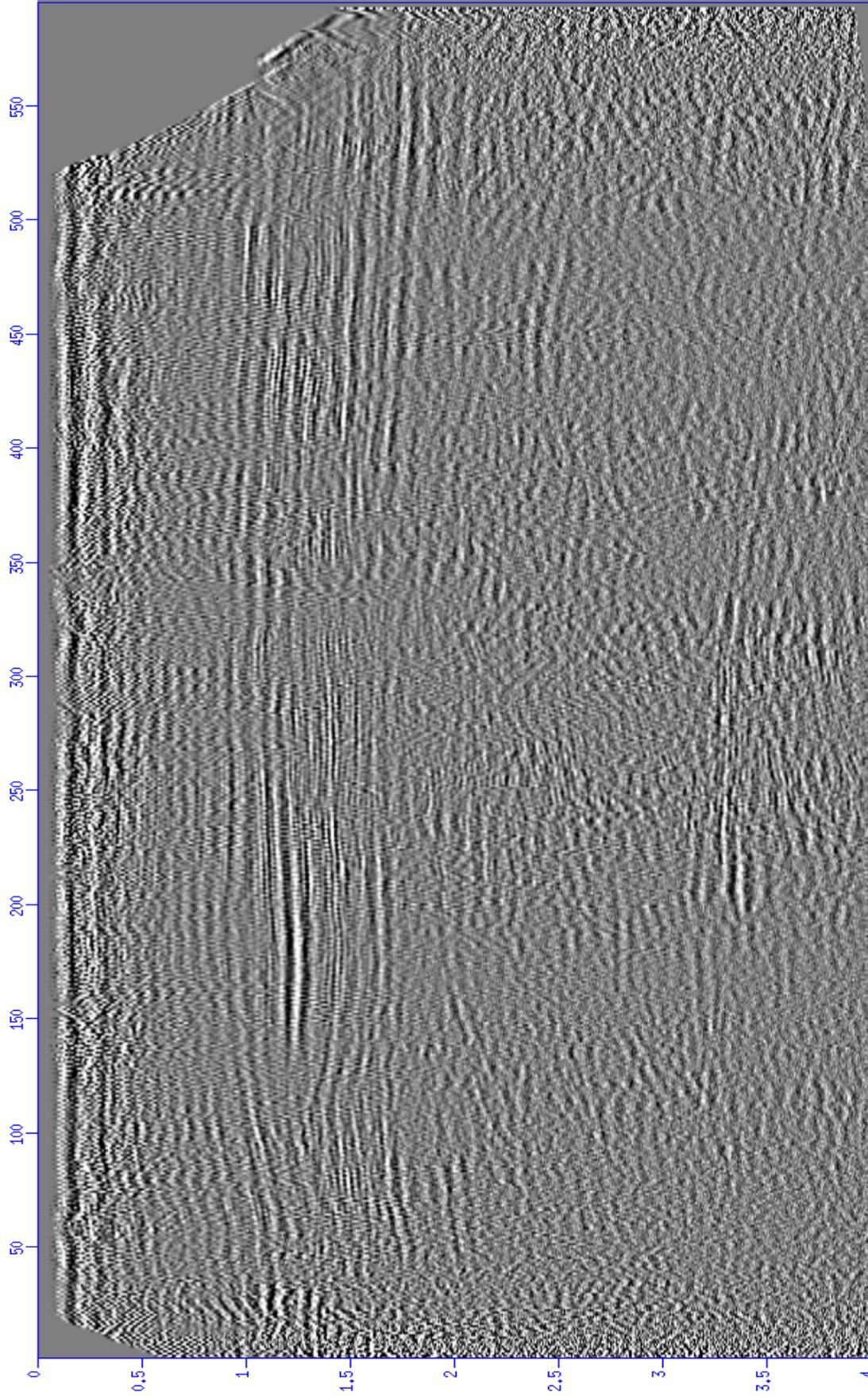


Figure 3.15: Linha sísmica empilhada após a aplicação da filtragem SVD no domínio da frequência.

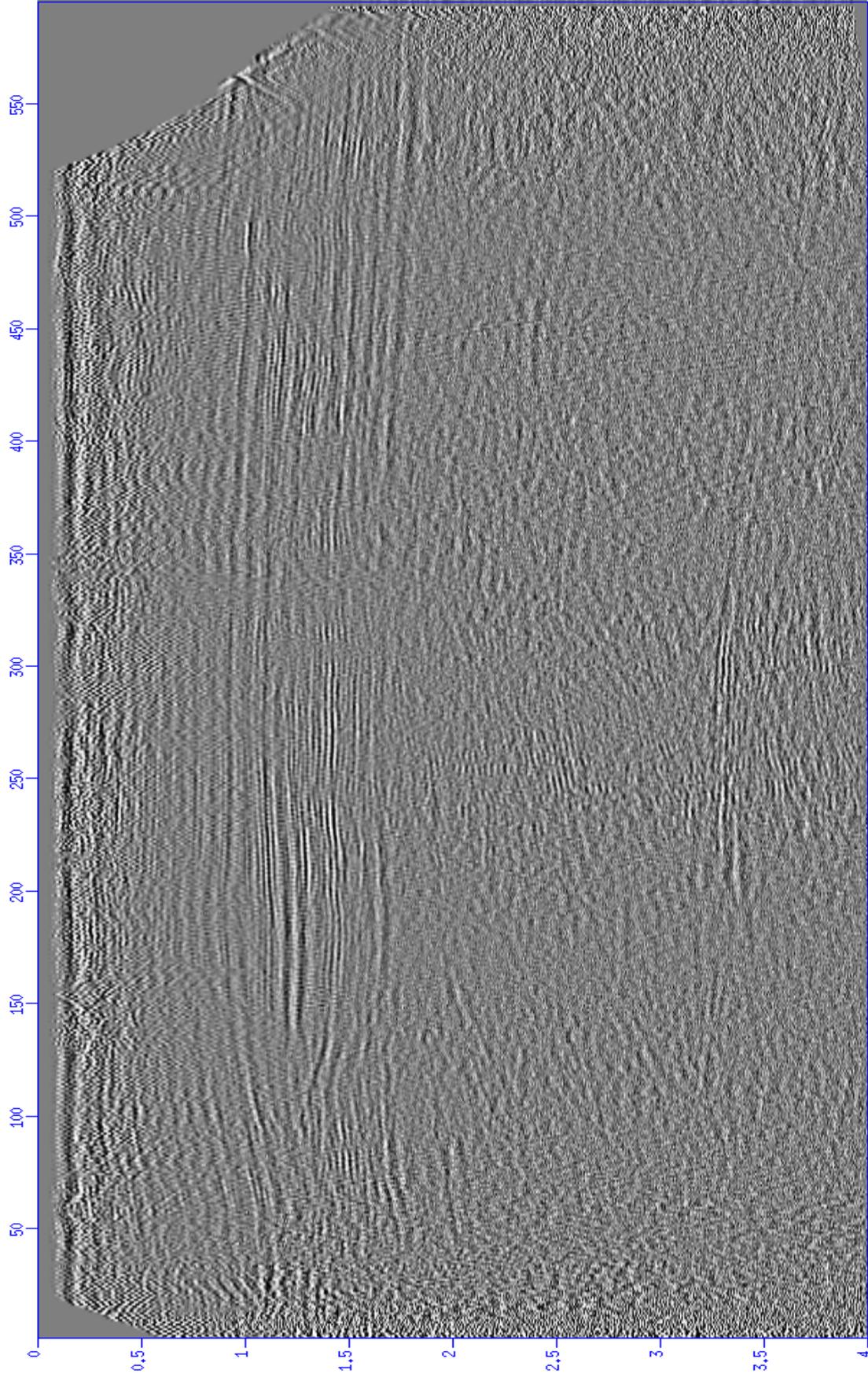


Figure 3.16: Linha sísmica empilhada após a aplicação da deconvolução no domínio da frequência.

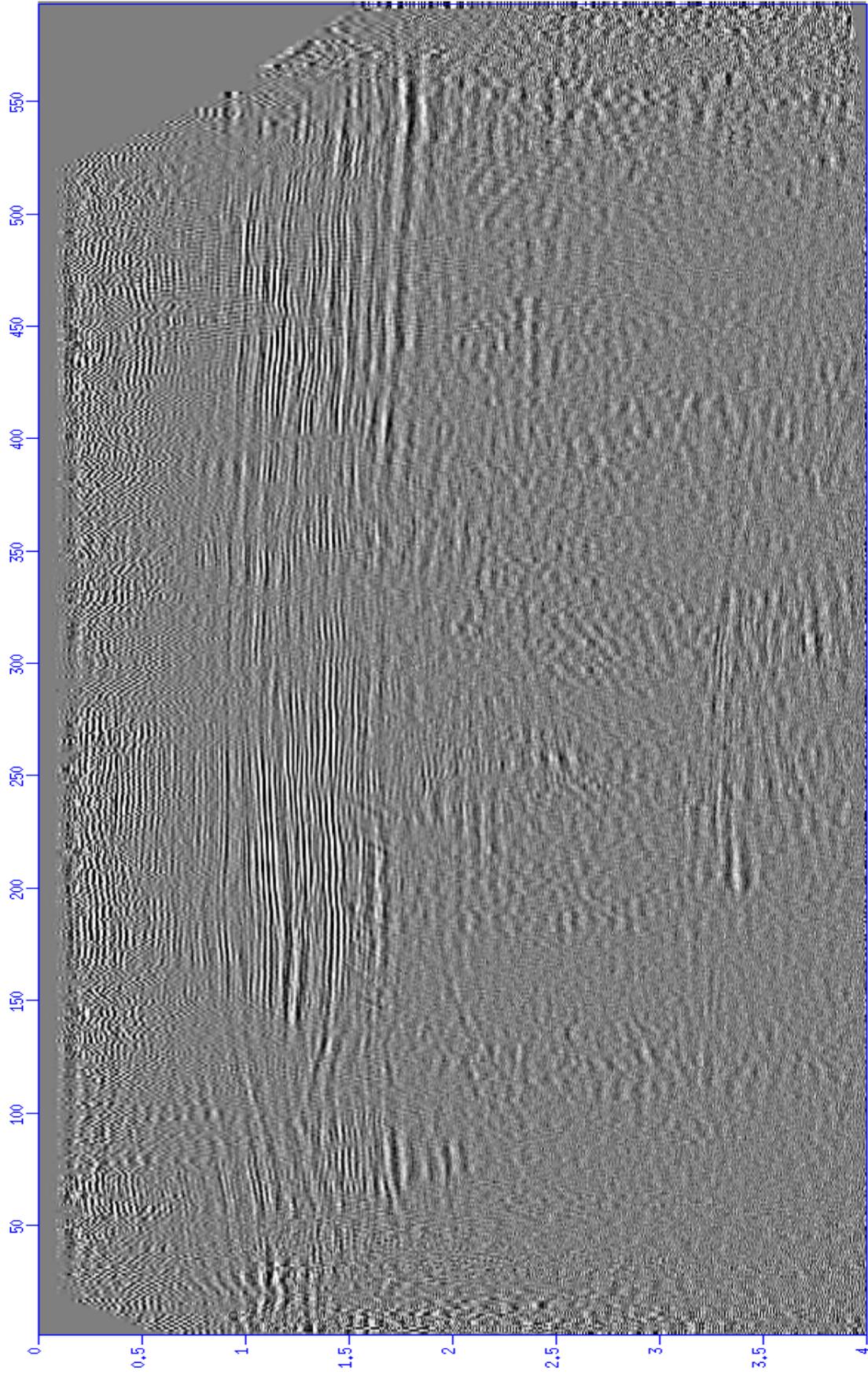


Figure 3.17: Linha sísmica empilhada após a aplicação da deconvolução WL e filtragem SVD no domínio do tempo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

O processamento de dados sísmicos é constituído de diversas etapas que tem como finalidade melhorar a qualidade do dado original, e por consequência obter uma seção sísmica com maior resolução das estruturas geológicas. Como mencionado anteriormente, são vários os fatores que podem prejudicar a qualidade do dado sísmico, um deles é a presença do *ground-roll*, ruído que está associado principalmente a dados sísmicos terrestres. Esse ruído é caracterizado por eventos coerentes e lineares, com altas amplitudes, baixas frequências e velocidades, sendo responsável por mascarar as reflexões, dificultando assim a interpretação dos dados.

Muitos métodos de filtragem vêm sendo desenvolvidos e testados em dados terrestres, afim de atenuar esse tipo de ruído e melhorar a razão sinal-ruído do dado. Os métodos conhecidos como convencionais como filtro passa-banda e filtro de frequências fk , tem sua eficiência questionada por empregarem a metodologia de corte, podendo ocasionar a perda de informações de interesse também presentes nas baixas frequências. Portanto, esse trabalho teve como objetivo comparar a eficiência de alguns métodos desenvolvidos e aplicados anteriormente, na linha sísmica 204-RL-247 da Bacia de Tacutu.

Foram utilizados as seguintes técnicas afim de atenuar o *ground-roll*: filtragem SVD no domínio do tempo, filtragem SVD no domínio da frequência, deconvolução no domínio da frequência. Posteriormente, afim de não só atenuar o evento *ground-roll* como também aumentar a razão sinal-ruído e resolução temporal do dado, aplicamos a combinação da deconvolução Wiener-Levinson com a filtragem SVD no domínio do tempo, que proporcionou o melhor resultado apresentado nesse trabalho.

Observou-se que os resultados obtidos pelos métodos aplicados no domínio da frequência, filtragem SVD e deconvolução adaptativa multicanal, foram eficientes na supressão do *ground-roll* se levarmos em comparação os testes feitos com o tiro 334, como observado nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente. No entanto, esses métodos não conseguiram melhorar substancialmente a razão sinal-ruído do dado, como ficou claro no espectro de velocidades e seções empilhadas apresentadas. Além disso, as seções empilhadas (Figuras 3.15 e 3.16) mostraram a presença de alguns "artefatos", que foram associados as mudanças de domínio realizadas.

A aplicação da filtragem SVD no domínio do tempo não foi tão eficiente na atenuação do *ground-roll* como imaginou-se que seria inicialmente, tomando como base o trabalho realizado por Ladino (2011). No entanto, o método foi eficiente em melhorar a coerência dos eventos de interesse que pôde ser observado no espectro de velocidades e seção empilhada gerados, Figuras 3.9 e 3.14, respectivamente.

O uso combinado das técnicas de deconvolução WL traço a traço e filtragem SVD no domínio do tempo apresentou uma melhor qualidade em relação aos outros métodos utilizados, que pode ser constatada não só pelas seções empilhadas, como também durante todas as outras etapas. Um campo de velocidades com maior precisão e maior coerência pôde ser gerado, traduzindo-se na melhoria da continuidade dos refletores (coerência espacial) na seção empilhada, valorizando os aspectos estratigráficos da linha sísmica utilizada nesse trabalho.

Por fim, os resultados apresentados nesse trabalho mostram a eficiência ou não dos métodos estudados durante esse trabalho. O mais importante é mostrar que a eficiência ou não de uma técnica de filtragem está diretamente associada as características e qualidade do dado original, por isso é necessário uma prévia avaliação do dado para definir o fluxograma de processamento a ser adotado. Além disso, a combinação de duas técnicas pode ser uma excelente opção para promover a melhoria na qualidade final da seção sísmica.

Referências Bibliográficas

- Alves, F. M. (2013) Atenuação do ground-roll utilizando filtragem adaptativa com filtros tipo wiener-levinson antissimétricos e decomposição em modos empírico, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Bekara, M. e Van der Baan, M. (2007) Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data, *Geophysics*, **72**(2):V59–V65.
- Cardoso, C. A. R. (2010) Atenuação do ground-roll utilizando filtragem svd, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Damasceno, R. D.; de Pinho Lima, A. e Porsani, M. J. (1999) Deconvolucao do pulso sismico utilizando filtragem wiener-levinson multicanal, In: *6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- Dantas, A. L. E. G. (2014) Atenuação do ground-roll utilizando deconvolução no domínio da frequência, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Ferreira, L. E. S. (2010) Aplicação do método de Decomposição em Modos Empíricos na atenuação do ruído de rolamento em dados sísmicos., Tese de Doutorado, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.
- Freire, S. L. M. (1986) Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos.
- Karsli, H. e Bayrak, Y. (2008) Ground-roll attenuation based on wiener filtering and benefits of time-frequency imaging, *The Leading Edge*, **27**(2):206–209.
- Ladino, O. F. M. (2011) Aplicações da filtragem svd na análise de velocidades e no empilhamento cmp.
- Lima, R. R. (2014) Atenuação do ground-rrroll utilizando filtragem adaptativa svd no domínio da frequência e deconvolução iterativa com norma lp, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Martinelli, J. C.; Lima, R. R. e Porsani, M. J. (2013) Atenuação do ground-roll utilizando filtragem adaptativa svd no doínio 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.
- Porsani, M. J. (1986) Desenvolvimento de algoritmos tipo-levinson para o processamento de dados sísmicos, Ph. D. Dissertation, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

- Porsani, M. J. e Ursin, B. (2007) Direct multichannel predictive deconvolution, *Geophysics*, **72**(2):H11–H27.
- Porsani, M. J.; Silva, M. G.; Melo, P. E.; Ursin, B. et al. (2009) Ground-roll attenuation based on svd filtering, In: *2009 SEG Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists.
- Santos, A. S. (2014) Atenuação do ground-roll utilizando filtragem direcional radial, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Silva, M. G. d. (2004) Processamento de dados sísmicos da bacia do tacutu, Dissert. de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Yilmaz, Ö. (2001) *Seismic data analysis*, vol. 1, Society of exploration geophysicists Tulsa.