



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



GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ATENUAÇÃO DO *GROUND ROLL* UTILIZANDO  
FILTRAGEM ADAPTATIVA COM FILTROS TIPO  
WIENER-LEVINSON ANTSSIMÉTRICOS E  
DECOMPOSIÇÃO EM MODOS EMPÍRICOS

FELIPE DA MOTA ALVES

SALVADOR – BAHIA

MARÇO – 2013



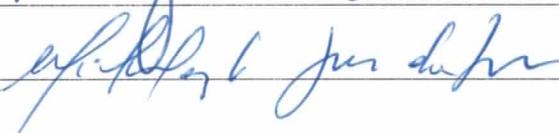
Atenuação do *Ground Roll* utilizando Filtragem Adaptativa com Filtros tipo  
Wiener-Levinson Antissimétricos e Decomposição em Modos Empíricos

por

FELIPE DA MOTA ALVES

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA  
DO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Comissão Examinadora

Dr. Milton J. Porsani - Orientador

Dr. Amin Bassrei

Msc. Michelângelo Gomes da Silva

Data da aprovação: 28/03/2013

Aos meus pais, familiares e amigos  
que sempre me apoiaram.

# RESUMO

O *ground roll* é um ruído comum em sismogramas terrestres. Ele tem como característica as altas amplitudes, baixa velocidade de propagação e baixas frequências. A atenuação do *ground roll*, ou do ruído de rolamento superficial como também é conhecido, é um desafio para o processamento de dados sísmicos, contudo sua atenuação torna-se essencial para uma seção empilhada final de boa qualidade. Filtros de frequência são comumente utilizados com o intuito de atenuar tal ruído, no entanto nem sempre os resultados obtidos são satisfatórios, pois, muitas vezes ao remover a banda de frequência do *ground roll* se remove também reflexões de interesse. No presente trabalho foram utilizados os métodos de deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson, que opera com filtro antissimétrico (DTWL), e de Decomposição em Modos Empíricos (DME) no intuito de atenuar o ruído de rolamento em dados sísmicos. Essa nova abordagem consiste em deconvolver os dados de forma adaptativa, ou seja, utilizando uma janela móvel que se desloca ao longo de cada traço e posteriormente aplicar o método DME que faz a extração dos diversos modos oscilatórios existentes no traço já deconvolvido, esses modos são denominados funções de modo intrínseco (FMIs) e cada uma delas tem uma banda de frequência característica. As primeiras FMIs apresentam uma frequência mais alta, enquanto as últimas a serem extraídas apresentam bandas de frequência mais baixas, ou seja, após a aplicação do método DME as FMIs são manipuladas de modo que prevaleça nos dados o sinal relativo as reflexões primárias. Os métodos DTWL e DME foram aplicados em dados reais da Bacia do Tacutu, linha sísmica 204-RL-247, os resultados obtidos foram satisfatórios tanto na aplicação individual quanto na aplicação conjunta dos métodos supracitados.

# ABSTRACT

The ground roll is a common noise in terrestrial seismograms. It is characterized by the high amplitudes, low propagation velocity and low frequencies. The attenuation of the ground roll, or surface rolling noise as it is also known, is a challenge to the seismic data processing, however its attenuation is essential to a good quality stacked final section. Frequency filters are commonly used in order to attenuate this noise, though not always results obtained are satisfactory, because, many times the process of removing the frequency band of the ground roll also removes reflections of interest. In this study we used the methods of adaptive Wiener-Levinson deconvolution, that operates with antisymmetric filter, we call it as deconvolution type Wiener-Levinson (DTWL), and Empirical Mode Decomposition (EMD) in order to attenuate the rolling noise in seismic data. This new approach consists in deconvolve the data adaptively, in other words, using a sliding window that moves along each trace and subsequently apply the EMD method that makes the extraction of the different oscillatory modes existing in the trace already deconvolved, these modes are called intrinsic mode functions (IMFs) and each one has a characteristic band frequency. The first IMFs present a higher frequency, while the last ones to be extracted exhibit lower frequency bands, in other words, after the application of the EMD method, the IMFs are manipulated so that it prevails in the data the signal relating of the primary reflections. The DTWL and EMD methods were applied in a real data of Tacutu Basin, seismic line 204-RL-247, the results obtained were satisfactory both, in individual application and in the combined application of the methods mentioned above.

# ÍNDICE

RESUMO . . . . .	iii
ABSTRACT . . . . .	iv
ÍNDICE . . . . .	v
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .	vii
INTRODUÇÃO . . . . .	1
<b>CAPÍTULO 1 A construção da imagem sísmica . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1 Aquisição de campo . . . . .	3
1.2 O Processamento de dados sísmicos . . . . .	4
1.2.1 Geometria . . . . .	4
1.2.2 Edição . . . . .	5
1.2.3 Correção de amplitude . . . . .	5
1.2.4 Filtragem . . . . .	5
1.2.5 Análise de velocidade . . . . .	5
1.2.6 Correção de NMO . . . . .	5
1.2.7 Empilhamento . . . . .	6
1.3 O <i>ground roll</i> . . . . .	6
<b>CAPÍTULO 2 Métodos de filtragem utilizados . . . . .</b>	<b>8</b>
2.1 O filtro de frequência passa-banda . . . . .	8
2.2 Deconvolução do pulso sísmico . . . . .	10
2.2.1 Deconvolução de Wiener-Levinson . . . . .	12
2.2.2 A obtenção de filtros antissimétricos . . . . .	13
2.2.3 Deconvolução na forma adaptativa . . . . .	15
2.3 O Método de Decomposição em Modos Empíricos . . . . .	16
<b>CAPÍTULO 3 Resultados e discussões . . . . .</b>	<b>20</b>
3.1 Descrição do dado utilizado . . . . .	20
3.2 Aplicação do filtro passa-banda . . . . .	23
3.3 Aplicação do método de deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson . . . . .	26
3.4 Aplicação do método DME no domínio do Tempo . . . . .	30

3.5	Aplicação conjunta dos métodos DME e de deconvolução adaptativa tipo Wiener-Levinson . . . . .	34
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>38</b>
	<b>Agradecimentos . . . . .</b>	<b>40</b>
	<b>Referências Bibliográficas . . . . .</b>	<b>41</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Arranjos de geofones mais utilizados em aquisições sísmicas 2D. Em (a) o arranjo <i>split-spread</i> e em (b) o <i>end-on spread</i> . . . . .	4
1.2	Esquema prático de uma aquisição sísmica utilizando a técnica CMP (Silva, 2004). . . . .	4
1.3	Figura ilustrando o movimento elíptico e retrógrado descrito pelas partículas de um sólido quando a onda Rayleigh se propaga na superfície do mesmo. . .	7
1.4	Sismograma real mostrando o efeito “mascarador” do <i>ground roll</i> na zona em vermelho. . . . .	7
2.1	Espectro de amplitude de um filtro passa-banda. . . . .	9
2.2	Fluxograma de aplicação do filtro passa-banda no domínio da frequência (Yilmaz, 2001). . . . .	9
2.3	Fluxograma de aplicação do filtro passa-banda no domínio do tempo (Yilmaz, 2001). . . . .	10
2.4	Modelo convolucional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (Brooks, 2009). . . . .	11
2.5	Representação esquemática de um filtro antissimétrico de três coeficientes. .	14
2.6	Sismograma deconvolvido com o filtro de Wiener-Levinson na forma convencional em (a) e com o filtro antissimétrico de Wiener-Levinson em (b). . . .	15
2.7	Espectro de amplitude médio. Sismograma original em azul, deconvolvido com o filtro de Wiener-Levinson na forma convencional em vermelho e com o filtro antissimétrico de Wiener-Levinson em verde . . . . .	15
2.8	O processo de deconvolução adaptativa modificado. . . . .	16
2.9	Traço sísmico com seus extremos mapeados (Ferreira, 2010). . . . .	17
2.10	Traço sísmico com seus envelopes construídos (Ferreira, 2010). . . . .	17
2.11	Traço sísmico com a média de seus envelopes calculadas (Ferreira, 2010). . .	18
2.12	Cinco FMIs de um traço sísmico e o resíduo à esquerda, seus respectivos espectros de amplitude à direita. . . . .	19
3.1	Fluxograma que descreve as etapas de processamento envolvidas na construção da seção empilhada bruta. . . . .	21
3.2	<i>Supergather</i> de cinquenta CMPs da linha bruta e seu respectivo <i>semblance</i> . .	22
3.3	Trecho da seção original, empilhada sem nenhum método de filtragem. . . .	22
3.4	Fluxograma de processamento utilizado na aplicação da filtragem passa-banda	23

3.5	Sismograma original em (a), após a filtragem passa-banda em (b) e resíduo entre os sismogramas anteriores em (c). . . . .	24
3.6	Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, após a filtragem passa-banda em vermelho e resíduo em verde. . . . .	24
3.7	<i>Supergather</i> de cinquenta CMPs do dado filtrado com o método passa-banda e seu respectivo <i>semblance</i> . . . . .	25
3.8	Trecho da seção empilhada filtrada com o filtro passa-banda. . . . .	25
3.9	Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, deconvolvido com janela móvel de 10 amostras em vermelho, 20 amostras em verde e 50 amostras em cinza. . . . .	26
3.10	Fluxograma que descreve as etapas de processamento na aplicação do método de deconvolução de Wiener-Levinson. . . . .	27
3.11	Sismograma original em (a), após a deconvolução WL utilizando filtro de um coeficiente em (b) e com dois coeficientes em (c). . . . .	28
3.12	Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, deconvolvido com filtro de um coeficiente em vermelho e deconvolvido com filtro de dois coeficientes em verde. . . . .	28
3.13	<i>Supergather</i> de cinquenta CMPs do dado filtrado com o método DTWL e seu respectivo <i>semblance</i> . . . . .	29
3.14	Trecho da seção empilhada filtrada com o método DTWL, utilizando filtro de apenas um coeficiente. . . . .	29
3.15	Fluxograma que descreve as etapas de processamento na aplicação do método DME no domínio do tempo. . . . .	30
3.16	As quatro primeiras FMIs extraídas em (a), (b), (c) e (d) respectivamente. . . . .	31
3.17	Espectro de amplitude médio. 1° FMI em azul, 2° FMI em vermelho, 3° FMI em verde e 4° FMI em cinza. . . . .	31
3.18	Sismograma original em (a), soma das duas primeiras FMIs em (b) e resíduo em (c). . . . .	32
3.19	Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, soma das duas primeiras FMIs em vermelho e resíduo em verde. . . . .	32
3.20	<i>Supergather</i> de cinquenta CMPs do dado filtrado com o método DME e seu respectivo <i>semblance</i> . . . . .	33
3.21	Trecho da seção empilhada filtrada com o método DME, soma das duas primeiras FMIs, no domínio do tempo. . . . .	33
3.22	Fluxograma que descreve as etapas de processamento na aplicação conjunta dos métodos DME e DTWL no domínio do tempo. . . . .	34
3.23	As quatro primeiras FMIs extraídas após a deconvolução em (a), (b), (c) e (d) respectivamente. . . . .	35

3.24	Espectro de amplitude médio. Dado original azul, após a deconvolução em vermelho, após a aplicação do método DME em verde e resíduo obtido entre a deconvolução e o método DME em cinza. . . . .	35
3.25	Sismograma original em (a), após a deconvolução em (b), após a soma das três primeiras FMIs em (c) e a diferença entre os sismogramas (b) e (c) em (d) respectivamente. . . . .	36
3.26	<i>Supergather</i> de cinquenta CMPs do dado filtrado com os métodos DTWL e DME e seu respectivo <i>semblance</i> . . . . .	37
3.27	Trecho da seção empilhada filtrada com os métodos DTWL e DME, soma das três primeiras FMIs, no domínio do tempo. . . . .	37

# INTRODUÇÃO

A sísmica atualmente é uma das atividades mais utilizadas pela indústria de petróleo, ela tem como objetivo fornecer imagens da subsuperfície baseada nos contrastes de propriedades acústicas das camadas litológicas. A atividade sísmica se inicia na aquisição de campo, passa pelo processamento dos dados e termina na interpretação, etapa na qual o interprete irá sinalizar áreas que tenham potencial para a exploração de hidrocarbonetos, se for esse seu objetivo.

O processamento dos dados é uma etapa crucial na construção da imagem sísmica, se ela for bem sucedida existem altas chances da alocação de poços ter sucesso. Uma das principais razões para que o processamento sísmico não alcance seus objetivos é a presença de ruídos, ou seja, registros captados pelos receptores que não pertencem as reflexões de interesse, causados pelo próprio aparelho de recepção ou por fatores ambientais diversos.

O *ground roll* é um dos principais ruídos presentes em dados sísmicos terrestres, sua existência está relacionada a propagação das ondas superficiais Rayleigh. Ele é um ruído coerente que tem como característica as altas amplitudes, baixas frequências, baixas velocidades e quando se propaga em meios não homogêneos ele é altamente dispersivo, mascarando as reflexões de interesse nos sismogramas.

Com o intuito de eliminar ruídos dos sismogramas vários métodos de filtragem foram desenvolvidos, os mais comuns são o passa-banda e o f-k (Embree et al., 1963; Fail e Grau, 1963; Treitel et al., 1967). A grande limitação desses filtros é que além de remover o ruído eles removem bandas de frequência relacionadas às reflexões de interesse. No presente trabalho, testamos uma nova abordagem que combina o método de deconvolução adaptativa baseado nos filtros causal e anticausal de Wiener-Levinson (DTWL) e Decomposição em Modos Empíricos (DME), visando atenuar o *ground roll* de uma forma eficiente, e com custo computacional e operacional relativamente baixo.

A deconvolução é um procedimento de extrema importância no processamento sísmico, pois visa aumentar a resolução temporal dos dados comprimindo o pulso emitido pela fonte e melhorando a definição de topo e base de uma determinada camada litológica. Partindo dos filtros causal e anticausal tipo Wiener-Levinson, é possível construir um filtro antissimétrico (DTWL), que quando aplicado de forma adaptativa nos dados é capaz de localizar e extrair grande parte da baixa frequência relacionada ao ruído *ground roll*.

O método de Decomposição em Modos Empíricos (Huang et al., 1998) consiste na decomposição de um sinal em funções de modo intrínseco (FMIs) que apresentam, cada uma delas, determinada banda de frequência. Sua aplicação em dados sísmicos consiste na decomposição de cada traço em FMIs de frequências decrescentes. O resultado é a decomposição da imagem original em painéis associados a cada uma das FMIs, preservando em cada painel feições do dado original decompostas a diferentes bandas de frequência.

Com o propósito de testar a eficiência dos métodos foi utilizada a linha 204-RL-247 da Bacia do Tacutu, fortemente contaminada pelo *ground roll*. Em uma primeira etapa os métodos foram aplicados separadamente, e posteriormente eles foram combinados, permitindo assim a verificação das vantagens e desvantagens da associação dos mesmos.

# CAPÍTULO 1

## A construção da imagem sísmica

### 1.1 Aquisição de campo

O primeiro passo na construção da imagem sísmica passa pela aquisição dos dados em campo, nela a fonte sísmica e os receptores são distribuídos na área de estudo, segundo um arranjo pré-determinado, e a partir daí são feitas medidas do tempo de trânsito das ondas emitidas entre a fonte e os sensores, gerando assim os sismogramas.

Nos primórdios da aquisição sísmica as companhias exploratórias buscavam meios de imagear grandes distâncias em subsuperfície de modo que os arranjos de geofones fossem deslocados amostrando determinado ponto uma única vez. Esse pensamento parecia ser excelente, já que tal metodologia diminuía muito os custos operacionais. Porém, com o passar dos anos e o avanço nas tecnologias, foi percebido que amostrar um mesmo ponto em subsuperfície mais de uma vez seria uma ótima alternativa para diminuir expressivamente o nível de ruído dos dados, surge então a técnica de aquisição CMP.

A técnica CMP consiste em iluminar um mesmo ponto diversas vezes em geofones distintos conforme o deslocamento do aparato de campo, e seu nome (*common midpoint method*) vêm do fato de que, supondo camadas planas e paralelas, o ponto iluminado está à meia distância da fonte e do receptor que percebeu a chegada da onda emitida. O grau de cobertura (*GC*) representa o número máximo de traços em uma família CMP e é dado por:

$$GC = \frac{n \cdot \Delta g}{2 \cdot d}, \quad (1.1)$$

na qual  $n$ =número de geofones,  $d$ =distância entre pontos de tiro consecutivos e  $\Delta g$ =distância entre geofones.

Os geofones podem ser dispostos em campo em dois padrões principais (em aquisições 2D), no *split-spread* eles são alocados dos dois lados da fonte emissora, enquanto no padrão *end-on* os geofones são dispostos em apenas um lado da fonte.

A Figura 1.2 ilustra esquematicamente o princípio de uma aquisição sísmica utilizando a técnica CMP, na qual são feitos sete disparos com os geofones dispostos em um padrão *split-spread* simétrico, sendo  $\Delta G$  o espaçamento entre geofones e  $\Delta S$  a distância entre dois pontos de tiro consecutivos.

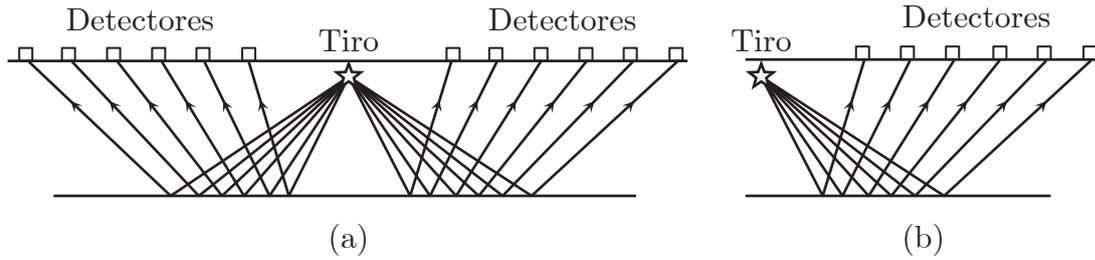


Figura 1.1: Arranjos de geofones mais utilizados em aquisições sísmicas 2D. Em (a) o arranjo *split-spread* e em (b) o *end-on spread*.

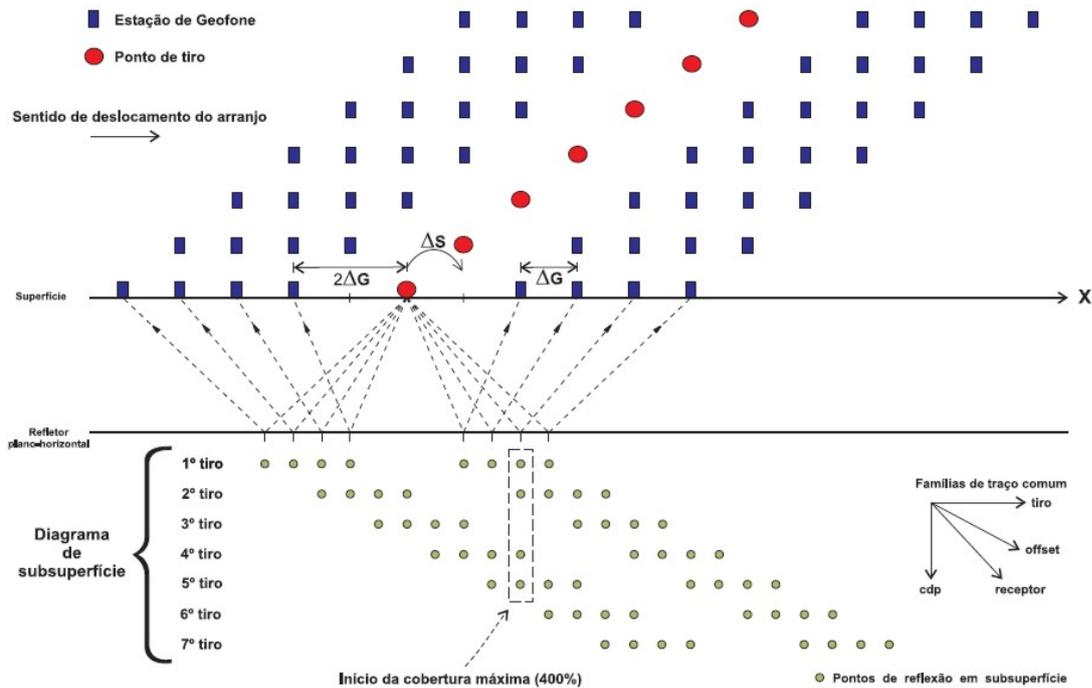


Figura 1.2: Esquema prático de uma aquisição sísmica utilizando a técnica CMP (Silva, 2004).

## 1.2 O Processamento de dados sísmicos

O processamento de dados sísmicos consiste no conjunto de etapas que irão converter os sismogramas obtidos no campo em imagens representativas da subsuperfície. As primeiras etapas são chamadas de pré-processamento e tem como objetivo preparar os dados para o processamento avançado (Silva, 2004).

### 1.2.1 Geometria

É uma etapa crucial no processamento de dados sísmicos, nela o processador insere no *header* dos sismogramas a posição de cada traço com relação à fonte sísmica calculando seus

respectivos afastamentos (*offsets*), o que permite, em etapas posteriores, o agrupamento dos traços em famílias CMP.

### **1.2.2 Edição**

Durante a aquisição dos dados em campo, os sensores de recepção podem não funcionar corretamente devido a problemas técnicos e a falhas operacionais gerando traços ruidosos ou com polaridade contrária aos demais traços nos sismogramas. A etapa de edição tem como objetivo corrigir tais erros de aquisição eliminando traços muito ruidosos e revertendo aqueles que tenham polaridade invertida.

### **1.2.3 Correção de amplitude**

As ondas sísmicas sofrem atenuação durante sua propagação no interior da terra. Isso ocorre principalmente devido a espalhamento geométrico e perdas por atrito. Para menores distâncias a perda por espalhamento geométrico é mais significativa em relação à dissipação por atrito, porém com o aumento da distância de propagação torna-se mais significativa as perdas por absorção em detrimento ao espalhamento geométrico (Yilmaz, 2001).

### **1.2.4 Filtragem**

Durante a aquisição sísmica são registrados diversos eventos nos receptores, porém somente as reflexões primárias são de interesse. A etapa de filtragem visa eliminar tais eventos, tratados como ruídos, e desse forma aumentar a razão sinal/ruído dos dados.

### **1.2.5 Análise de velocidade**

Através das hipérbolas geradas pelos registros das reflexões primárias é possível estimar a velocidade média que a onda levou para se propagar da superfície até a camada que gerou tal reflexão e retornou para ser registrada. Essa etapa é crucial para a qualidade da seção sísmica final.

### **1.2.6 Correção de NMO**

Corrige o atraso do tempo de chegada, com relação ao tempo duplo de incidência normal (Silva, 2004). Tal correção é feita a partir da estimativa da velocidade feita anteriormente.

### 1.2.7 Empilhamento

Assim que o dado é corrigido de NMO, os traços provenientes de um mesmo ponto em subsuperfície (famílias CMPs), podem ter suas amplitudes somadas aritmeticamente (empilhadas), produzindo assim um único traço representante daquela família. O principal objetivo do empilhamento é minimizar as amplitudes de ruídos incoerentes, que quando somados tem suas amplitudes fortemente atenuadas.

## 1.3 O *ground roll*

Na sismica de exploração as reflexões primárias que ocorrem em subsuperfície são as principais fontes de informações utilizadas pelo geofísico para se obter detalhes da geologia de uma determinada área, tudo aquilo que é gravado pelo sensor que não seja reflexão primária (no caso da sismica de reflexão) é considerado ruído e deve ser eliminado do dado ou ao menos atenuado para que não prejudique outras etapas da jornada sísmica. Os ruídos são subdivididos em coerentes, pois seguem um padrão facilmente detectável traço à traço e são causados pela própria fonte sísmica; ou aleatórios, pois estão dispostos de forma aleatória no dado ocorrendo muitas vezes de forma isolada em um conjunto de traços, sendo causado principalmente por fatores ambientais.

A energia liberada após a detonação de uma fonte sísmica se propaga no interior da terra a partir das ondas de corpo P e S, e pela superfície através das ondas Love e Rayleigh. Os geofones convencionais, por serem monoaxiais<sup>1</sup>, só detectam a componente vertical de cada evento gerado pela fonte, por esse motivo as ondas P, puramente longitudinais, são facilmente percebidas pelos sensores sendo elas as responsáveis pelas informações de subsuperfície geradas em levantamentos sísmicos convencionais. Porém a componente vertical das ondas Rayleigh também são detectados e gravadas pelos geofones.

O registro da componente vertical das ondas Rayleigh em sismogramas terrestres é comumente conhecido como ruído *ground roll*, ele é um ruído linear cuja amplitude decai fortemente com a profundidade e é proporcional a distância percorrida ( $r$ ) segundo a relação  $1/\sqrt{r}$ . Devido a esse fato o *ground roll* apresenta uma amplitude superior aos eventos sísmicos de interesse que tem um decaimento de amplitude com a distancia percorrida ( $r$ ) maior, proporcional a  $1/r$ .

Além das altas amplitudes o *ground roll* apresenta algumas características bem definidas como a concentração da energia nas baixas frequências (por volta de 10 Hz) e uma velocidade de propagação baixa que varia de 100 à 1000 m/s, essas características peculiares permitem a diferenciação entre ruído e sinal.

---

<sup>1</sup>geofones que detectam variações de pressão em apenas uma componente espacial.

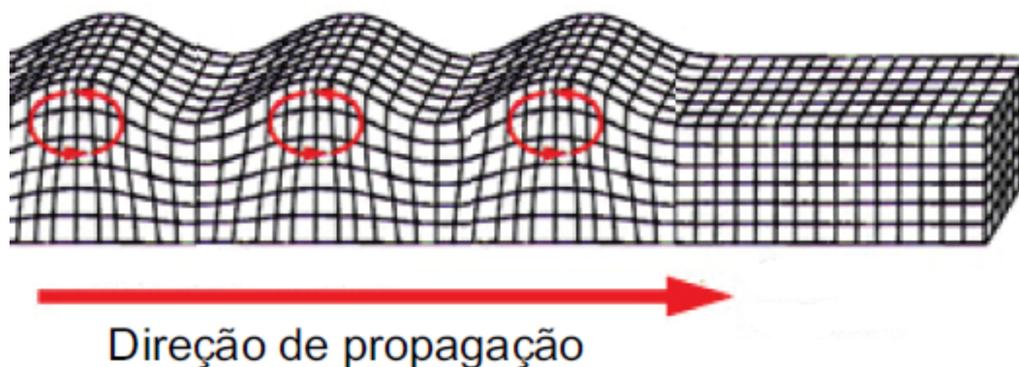


Figura 1.3: Figura ilustrando o movimento elíptico e retrógrado descrito pelas partículas de um sólido quando a onda Rayleigh se propaga na superfície do mesmo.

Nos sismogramas ele se apresenta na forma de cone ou semi-cone (dependendo do arranjo utilizado na aquisição) com uma inclinação acentuada, devido a sua baixa velocidade, e caráter muito dispersivo, se sobrepondo as reflexões de interesse com suas altas amplitudes prejudicando tanto o processamento quanto a interpretação dos dados sísmicos.

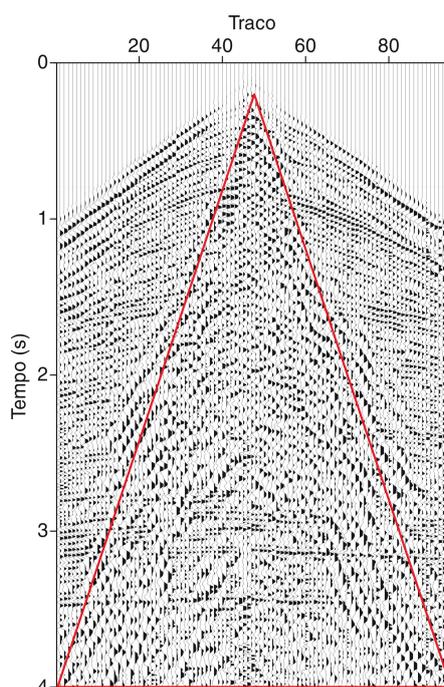


Figura 1.4: Sismograma real mostrando o efeito “mascarador” do *ground roll* na zona em vermelho.

## CAPÍTULO 2

# Métodos de filtragem utilizados

### 2.1 O filtro de frequência passa-banda

Uma importante ferramenta na supressão de ruídos sísmicos é a filtragem passa-banda. Ela consiste em levar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência removendo as bandas de frequências desejadas. O traço sísmico pode ser considerado como uma função variável no tempo e que pode ser representado por um somatório de senoides, em que cada uma delas apresenta uma amplitude, frequência temporal e fase características. Uma ferramenta poderosa que nos permite decompor o sinal em tais funções é a transformada de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.1)$$

na qual,  $t$  é o tempo e  $\omega$  é a frequência angular, dada por:

$$\omega = 2\pi f. \quad (2.2)$$

Para o uso em computadores, no processamento de sinais digitais amostrados, é utilizada a transformada discreta de Fourier. O método largamente utilizado para o cálculo computacional desta versão é o algoritmo da *Fast Fourier Transform (FFT)* ou transformada rápida de Fourier.

O processo de transformação é reversível, o que permite ao operador remover a banda de frequência indesejada, após a aplicação da transformada de Fourier, e retornar com os dados para o domínio do tempo com o auxílio da transformada inversa de Fourier, descrita matematicamente por:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{i\omega t} dt \quad (2.3)$$

Na Figura 2.1 é ilustrado o formato trapezoidal do filtro passa-banda, ele trabalha fazendo com que as amplitudes com frequências que antecedem  $f_1$  sejam completamente eliminadas, entre  $f_1$  e  $f_2$  essas amplitudes são atenuadas, entre  $f_2$  e  $f_3$  elas não sofrem nenhum tipo de intervenção do filtro voltando a ser atenuadas de  $f_3$  a  $f_4$  e sendo eliminadas novamente de  $f_4$  até uma frequência  $f_n$ , que é a frequência máxima que um determinado

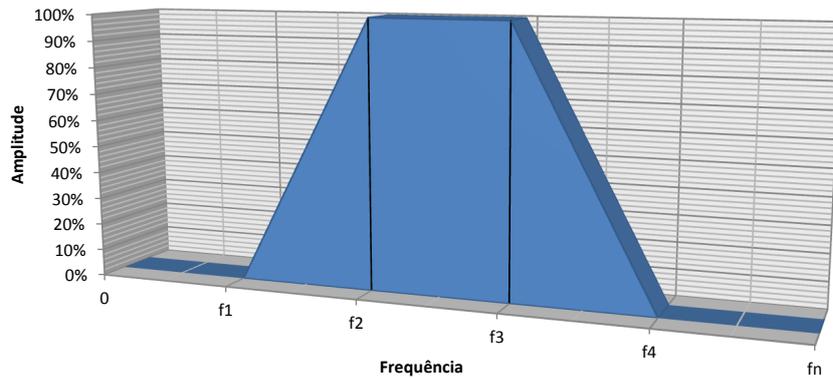


Figura 2.1: Espectro de amplitude de um filtro passa-banda.

dado amostrado pode atingir, denominada frequência de Nyquist, definida por:

$$f_n = \frac{1}{2\Delta t}, \quad (2.4)$$

sendo  $\Delta t$  o intervalo de amostragem.

No caso da atenuação do *ground roll* a banda de frequência a ser eliminada no domínio de Fourier é a mais baixa (filtro passa-alta), já que elas são características daquele ruído. Os passos para a aplicação da filtragem passa-alta no domínio da frequência podem ser exemplificados no fluxograma da Figura 2.2 (Yilmaz, 2001).

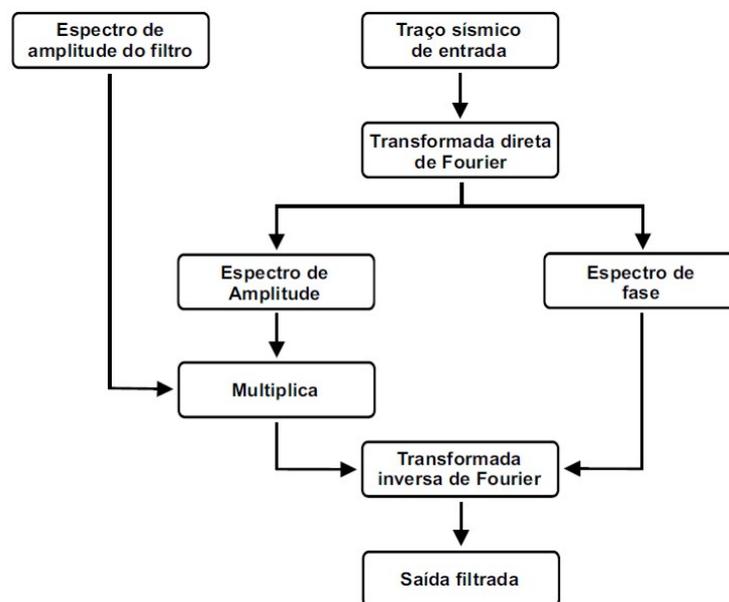


Figura 2.2: Fluxograma de aplicação do filtro passa-banda no domínio da frequência (Yilmaz, 2001).

A filtragem também pode ser executada no domínio do tempo, como é ilustrado na Figura 2.3. Os dois tipos de aplicação geram resultados idênticos, porém a execução no domínio do tempo é mais simples, ou seja, demanda um menor custo computacional e conseqüentemente menos tempo de processamento.

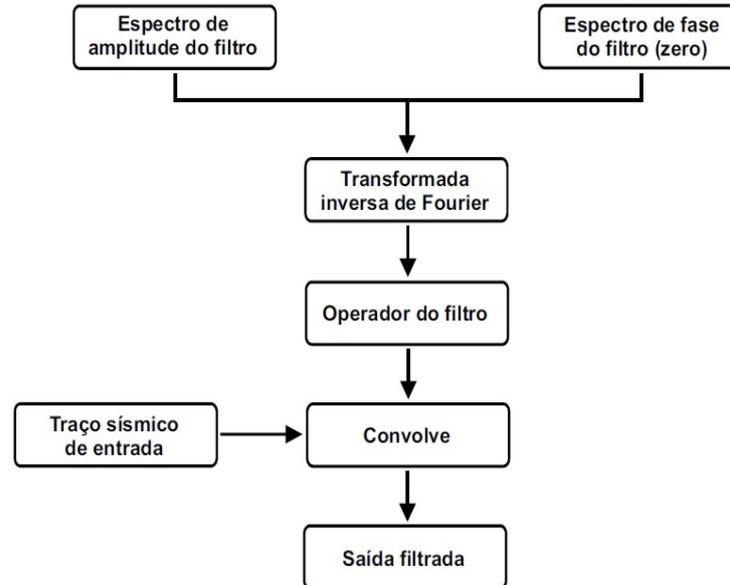


Figura 2.3: Fluxograma de aplicação do filtro passa-banda no domínio do tempo (Yilmaz, 2001).

## 2.2 Deconvolução do pulso sísmico

Para um boa compreensão do processo de deconvolução é necessário o conhecimento prévio de uma propriedade física das rochas chamada impedância acústica. A impedância acústica ( $I$ ) é definida como o produto da velocidade de propagação de uma onda sísmica ( $v$ ) em uma litologia pela densidade ( $\rho$ ) do meio, e representa a dificuldade com que tal onda reverbera no mesmo. O contraste entre as impedâncias acústicas das rochas de uma determinada formação é denominado de função refletividade ( $R$ ).

$$I = \rho.v \quad (2.5)$$

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (2.6)$$

A função refletividade é o que se deseja obter nos levantamentos realizados pela sísmica, porém a assinatura da fonte sísmica e ruídos de origem tanto ambiental quanto instrumental também são registrados pelos sensores dificultando o conhecimento de tal função, como demonstrado matematicamente pelo modelo convolucional do traço sísmico ( $x_t$ ):

$$x_t = p_t * e_t + n_t \quad (2.7)$$

onde,

- $p_t$  é o pulso emitido pela fonte;

- $e_t$  é a resposta impulsiva da terra;
- $n_t$  é o ruído superimposto ao sinal.

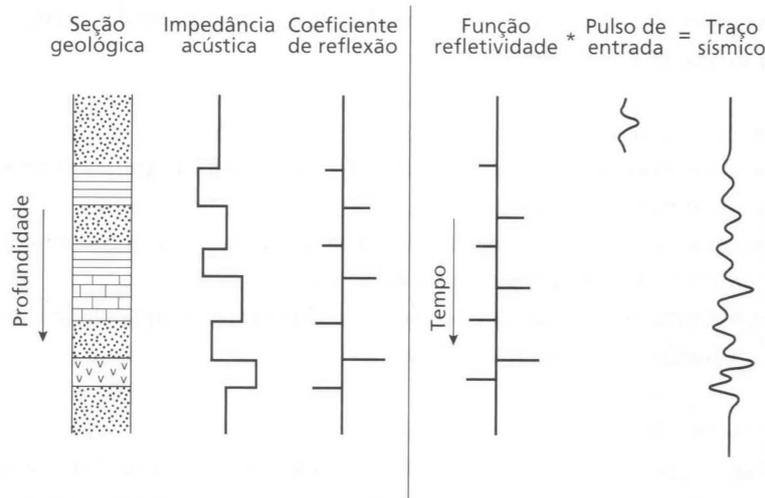


Figura 2.4: Modelo convolucional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (Brooks, 2009).

O processo de deconvolução visa recuperar a função refletividade a partir da equação (2.7), aumentando assim a resolução temporal dos dados e facilitando o reconhecimento das litologias. Para isso é preciso primeiramente se fazer algumas considerações (Yilmaz, 2001):

- A Terra é constituída por camadas horizontais com velocidade constante;
- A fonte sísmica gera uma onda compressional plana que atinge as camadas em incidência normal;
- A forma da onda não muda durante a propagação em subsuperfície, ou seja, ela é estacionária. Não se consideram o decaimento da amplitude e a atenuação das altas frequências;
- O ruído  $n_t$  é desprezível;
- O pulso  $p_t$  é conhecido.

Partindo do pressuposto de que tais premissas são válidas, busca-se agora encontrar um filtro  $h_t$  que quando convolvido com o traço  $x_t$  restitua a resposta impulsiva da terra.

$$h_t * x_t = h_t * p_t * e_t = \delta_t * e_t = e_t \quad (2.8)$$

sendo,

$$\delta_t = \begin{cases} 0, & \text{se } t \neq 0 \\ 1, & \text{se } t = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Se conhecemos o pulso, é possível resolver o sistema de  $N+1$  equações com base no método dos mínimos quadrados (Berkhout, 1977) e encontrar o filtro ótimo que deconvolve o traço a partir das equações normais (2.10).

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_{-1} & \dots & r_{-N} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{-1} \\ r_N & \dots & r_1 & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

na qual  $r_k$  representa o  $k$ -ésimo coeficiente da função de autocorrelação (FAC) do pulso, dado por:

$$r_k = \sum_t p_t p_{t+k}. \quad (2.11)$$

A matriz representada em (2.10) é denominada matriz de autocorrelação banda estruturada Toeplitz, ela é simétrica com relação à diagonal principal e pode ser facilmente resolvida através da recursão de Levinson (Levinson, 1947; Porsani, 1986). Para se evitar instabilidade numérica da solução, usualmente adiciona-se à diagonal da matriz dos coeficiente um percentual baixo do coeficiente  $r_0$ , esse recurso é denominado *luz branca*.

Quando não conhecemos o pulso, a deconvolução é feita estimando a função de autocorrelação (FAC) do pulso a partir do próprio traço. Quando isso ocorre o processo de deconvolução passa a ter um caráter estatístico e se faz necessário a utilização de mais duas premissas (Robinson e Treitel, 2000) para que o procedimento ocorra sem contratempos:

- a refletividade é aleatória;
- o pulso sísmico é de fase mínima.

### 2.2.1 Deconvolução de Wiener-Levinson

Quando o pulso não é conhecido, como é o caso da maioria dos levantamentos sísmicos, é possível estimar o filtro inverso que deconvolve o traço se dispomos de uma estimativa de sua função de autocorrelação (FAC). Partindo do pressuposto de que o modelo de predição unitária também é autorregressivo, no qual cada amostra do sinal no tempo é obtida como

combinação linear de  $N$  valores de amostras passadas, podemos representar o erro de predição para um operador causal como:

$$e_t = x_t - \tilde{x}_t = x_t - \sum_{j=1}^N x_{t-j} \tilde{a}_j \quad (2.12)$$

Fazendo  $-\tilde{a}_j = c_j$  para  $j = 1, \dots, N$  e utilizando a metodologia dos mínimos quadrados temos as equações normais que irão nos fornecer os operadores causais, e anticausais caso a equação (2.12) seja modificada e passe a prever amostras a partir da combinação linear de amostras futuras.

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_{-1} & \dots & r_{-N} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{-1} \\ r_N & \dots & r_1 & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & c_N^- \\ c_1^+ & \vdots \\ \vdots & c_1^- \\ c_N^+ & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_N^+ & 0 \\ 0 & \vdots \\ \vdots & 0 \\ 0 & E_N^- \end{pmatrix}, \quad (2.13)$$

na qual  $r_k$  agora representa o  $k$ -ésimo coeficiente da FAC, não mais do pulso, e sim do próprio traço, dado por:

$$r_k = \sum_t x_t x_{t+k}. \quad (2.14)$$

Devido à estrutura Toeplitz da matriz de autocorrelação, os coeficientes de mesmo índice do filtro causal e anticausal são idênticos. O sistema representado na equação 2.13 também pode ser resolvido com o auxílio da recursão de Levinson e conseqüentemente os filtros obtidos a partir dele são denominados filtros de Wiener-Levinson (WL).

$$c_j^+ = c_j^-, \quad j = 1, \dots, N \quad (2.15)$$

É importante notar que devido às simetrias e bandeamentos co-diagonais da matriz de autocorrelação (estrutura Toeplitz) a soma total dos erros quadrados minimizados é a mesma nos operadores causais e anticausais.

$$E_N^+ = E_N^- \quad (2.16)$$

### 2.2.2 A obtenção de filtros antissimétricos

Os filtros causais e anticausais de WL podem ser manipulados de modo a gerar um único filtro antissimétrico, eficaz na atenuação do *ground roll* devido ao seu efeito semelhante ao de uma derivação temporal dos dados.

No início desta seção foi visto que a convolução do filtro com o traço sísmico nos fornece a função refletividade, no entanto ao invés de executarmos esse processo com apenas uma componente (causal ou anticausal) ele é feito da seguinte maneira:

$$e_t^a = x_t * f_t^a, \quad (2.17)$$

sendo,  $f_t^a = (-c_N^-, \dots, -c_1^-, 0, c_1^+, \dots, c_N^+)$ .

$$e_t^a = x_t * (c_t^+ - c_t^-) = e_t^+ - e_t^-, \quad (2.18)$$

na qual,  $e_t^+$  e  $e_t^-$  representam os traços deconvolvidos com o filtro causal e anticausal.

A partir da equação (2.18) podemos concluir que o filtro antissimétrico pode também ser obtido ao convolvermos o filtro causal e anticausal com o traço separadamente, e depois subtrairmos os resultados.

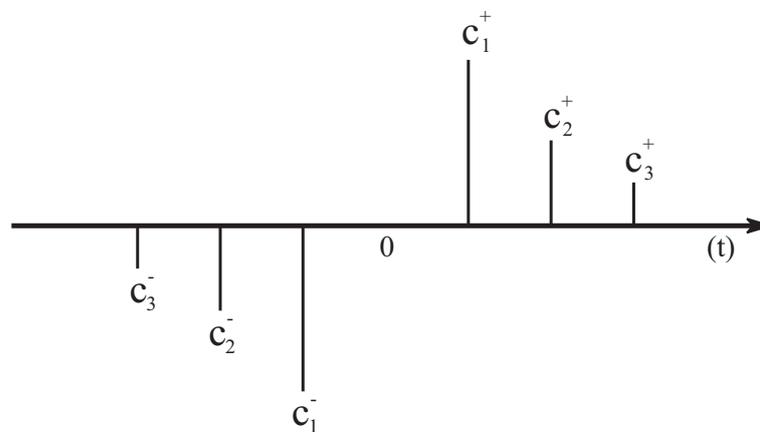


Figura 2.5: Representação esquemática de um filtro antissimétrico de três coeficientes.

Na Figura 2.6 foi feito um comparativo entre a deconvolução de Wiener-Levinson na forma convencional (utilizando apenas o filtro causal) e na forma proposta no presente trabalho (utilizando os filtros causal e anticausal). A partir do espectro de amplitude médio da Figura 2.7 podemos constatar uma redução maior das baixas frequências quando é utilizado o filtro antissimétrico.

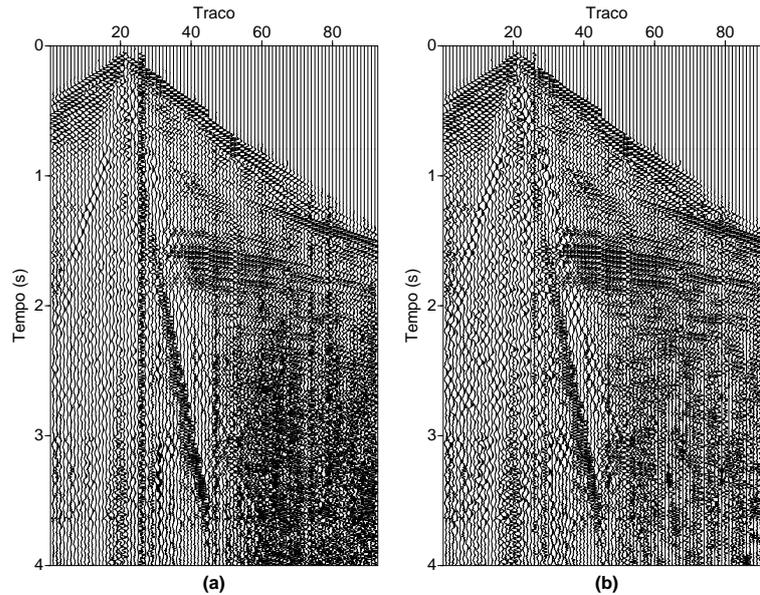


Figura 2.6: Sismograma deconvolvido com o filtro de Wiener-Levinson na forma convencional em (a) e com o filtro antissimétrico de Wiener-Levinson em (b).

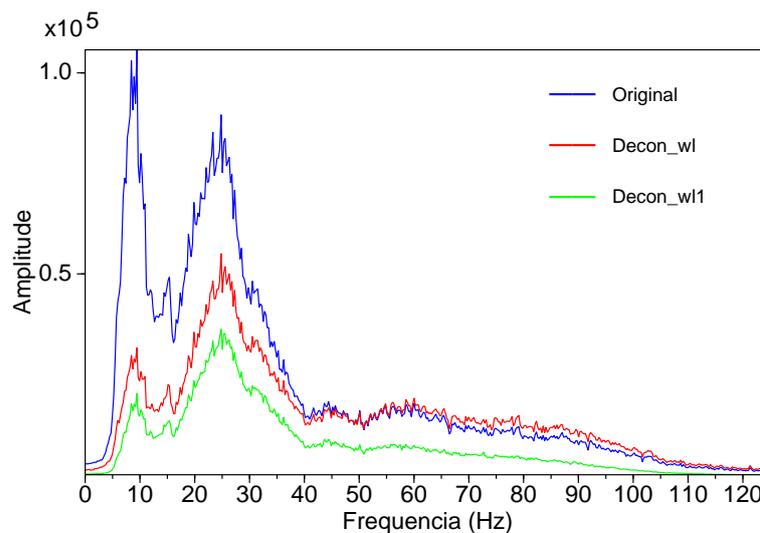


Figura 2.7: Espectro de amplitude médio. Sismograma original em azul, deconvolvido com o filtro de Wiener-Levinson na forma convencional em vermelho e com o filtro antissimétrico de Wiener-Levinson em verde

### 2.2.3 Deconvolução na forma adaptativa

Na deconvolução convencional, o traço sísmico como um todo é utilizado para se calcular as funções de autocorrelação e estimar assim o filtro inverso que deconvolve o próprio traço.

Porém, esse processo pode funcionar de forma adaptativa, se fizermos com que uma janela deslizante, com comprimento fixo, se mova e calcule o filtro para cada porção do traço.

Esse procedimento é denominado adaptativo, pois, o filtro se adapta as mudanças na forma do pulso que ocorrem quando ele se propaga em subsuperfície, trazendo o processo deconvolutivo para mais próximo das condições reais e aumentando assim a eficácia do mesmo.

Tradicionalmente, o processo 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. Esse procedimento é eficaz, no entanto, partindo do pressuposto de que uma mesma amostra é deconvolvida com diferentes filtros (a cada deslocamento da janela móvel, o filtro muda sensivelmente) podemos agrupar esses resultados e compor o traço filtrado com a média aritmética dos resultados da deconvolução de uma mesma amostra com diferentes filtros.

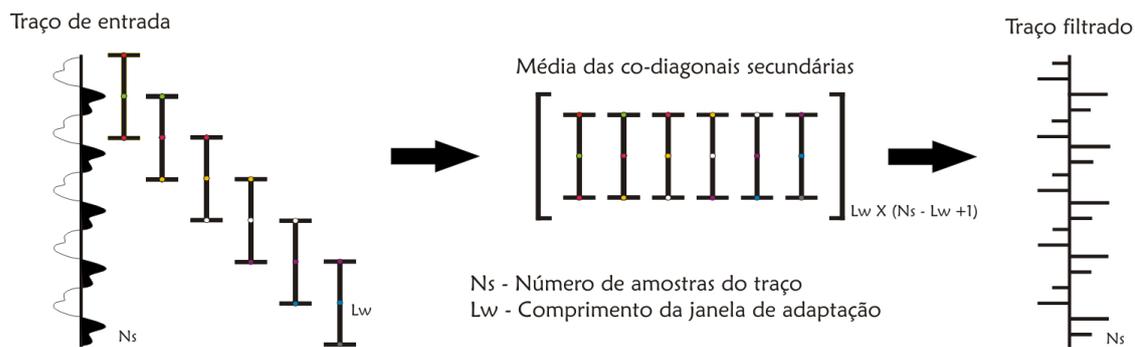


Figura 2.8: O processo de deconvolução adaptativa modificado.

### 2.3 O Método de Decomposição em Modos Empíricos

O método de Decomposição em Modos Empíricos (DME) é um método de tratamento de sinais desenvolvido por Huang et al. (1998) que visa extrair o máximo de informações possíveis do comportamento oscilatório de um dado sinal. O método DME, como também é conhecido, parte do pressuposto de que diversos modos oscilatórios compõem um mesmo sinal, tendo cada um deles uma frequência característica que preservam, ao seu modo, feições do dado original. Cada um destes modos oscilatórios é representado por uma função de modo intrínseco (FMI), que apresenta, cada uma delas, as seguintes características:

- O número de zeros e extremos do conjunto de dados são iguais ou diferem de no máximo um;

- São simétricas com relação à média, ou seja, para qualquer ponto, a soma do valor da envoltória máxima com a envoltória mínima é igual à zero.

Essas duas condições asseguram que as funções serão simétricas com relação à média local e que a frequência instantânea não terá um comportamento anômalo que não preserve características do dado original.

O processo para a aplicação do método DME é simples e está dividido em três passos principais:

1. O traço sísmico é mapeado e são identificados todos os extremos locais (pontos de máximo e mínimo).

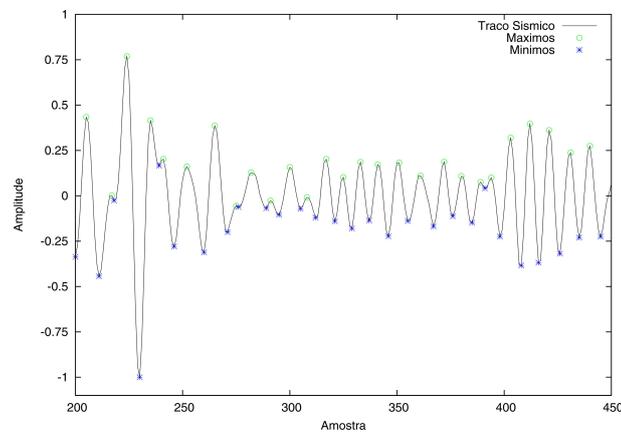


Figura 2.9: Traço sísmico com seus extremos mapeados (Ferreira, 2010).

2. Os pontos de máximo e mínimo são interpolados obtendo-se assim envelopes de máximo e mínimo. Para este passo foi utilizada a sub-rotina de interpolação 1D (Porsani, 2009) desenvolvida com base no inverso das distâncias (Shepard, 1968).

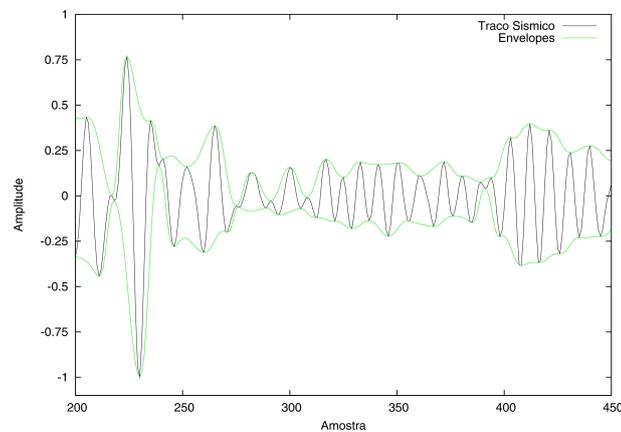


Figura 2.10: Traço sísmico com seus envelopes construídos (Ferreira, 2010).

3. Para cada ponto é calculada uma média  $m_1$  dos envelopes de máximo e mínimo, que é subtraída do sinal de entrada  $X(t)$ . O Resultado da diferença é uma candidata à FMI  $\Psi_1(t)$ .

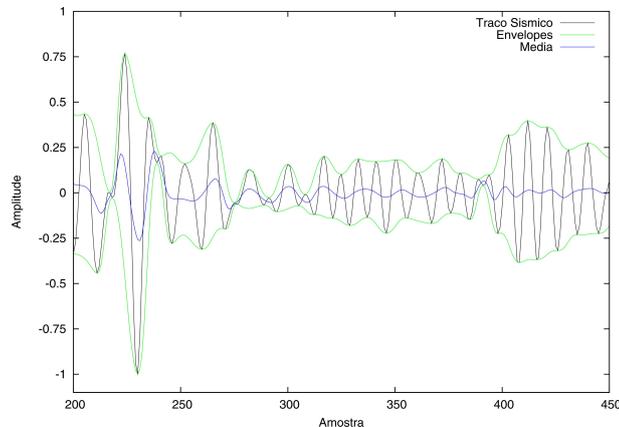


Figura 2.11: Traço sísmico com a média de seus envelopes calculadas (Ferreira, 2010).

Matematicamente o processo pode ser descrito por:

$$m(t) = \frac{e_{sup}(t) + e_{inf}(t)}{2} \quad (2.19)$$

$$\Psi_1(t) = X(t) - m(t) \quad (2.20)$$

Para ser considerada uma FMI,  $\Psi_1(t)$  deve satisfazer as condições apresentadas no início da seção, caso isso não ocorra,  $\Psi_1(t)$  é tratado como um novo sinal de entrada e o processo de separação é repetido  $n$  vezes até que alguma candidata obedeça as condições e se torne efetivamente uma FMI ou segundo uma tolerância ( $tol$ ) dada pela equação (2.22) definida por Huang et al. (1998) para que o processo não se estenda indefinidamente:

$$\Psi_{11}(t) = \Psi_1(t) - m_1(t) \quad (2.21)$$

⋮

$$\Psi_{1n}(t) = \Psi_{1(n-1)}(t) - m_{1(n-1)}(t)$$

$$\sum_t \left( \frac{\Psi_i(t) - \Psi_{i-1}(t)}{\Psi_{i-1}(t)} \right)^2 < tol. \quad (2.22)$$

Quando encontrada a FMI é retirada do dado e a partir do resíduo se obtém novas FMIs:

$$r_1(t) = X(t) - \Psi_1(t) \quad (2.23)$$

$$\vdots$$

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - \Psi_n(t)$$

O conjunto de FMIs retirada do dado, juntamente com o resíduo, quando somados restituem o dado original, essa propriedade permite a manipulação dos painéis de FMIs de modo que permaneça no dado apenas as bandas de frequência desejadas, já que as FMIs apresentam bandas de frequências decrescentes conforme a ordem com que elas são retiradas do sinal de entrada (Figura 2.12).

$$X(t) = \sum_{i=1}^N \Psi_i(t) + r_n(t) \quad (2.24)$$

Cada sinal apresenta um número finito de FMIs, por isso o processo de decomposição não pode continuar indefinidamente. O processo de retirada das FMIs termina quando o operador define um número máximo de FMIs à serem obtidas ou quando só restam na função principal três extremos, na qual não é possível traçar envelopes.

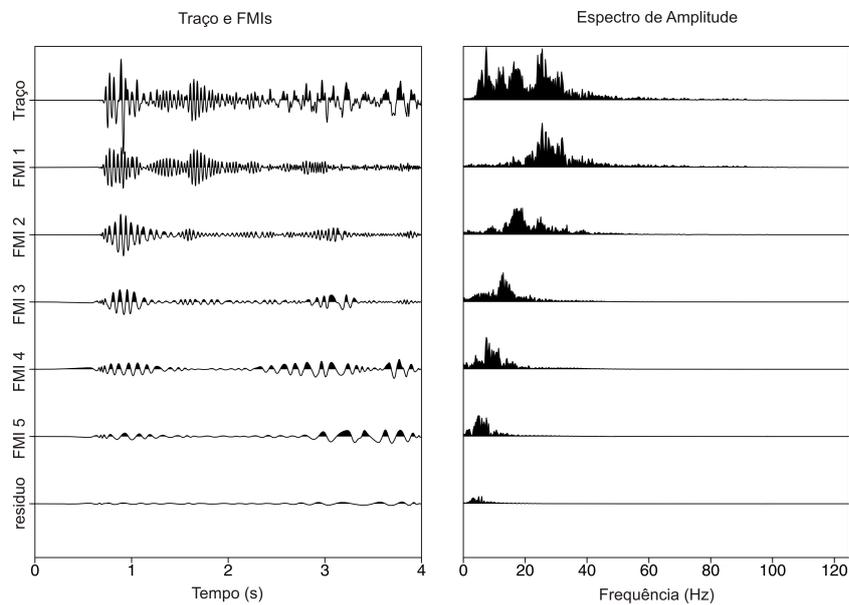


Figura 2.12: Cinco FMIs de um traço sísmico e o resíduo à esquerda, seus respectivos espectros de amplitude à direita.

## CAPÍTULO 3

### Resultados e discussões

Para testar a eficácia do uso dos métodos de deconvolução de Wiener-Levinson e DME na filtragem do *ground roll*, foi utilizada uma linha sísmica real da Bacia do Tacutu. As etapas de processamento foram executadas utilizando o *software* gratuito *Seismic Unix* (SU), excetuando-se os métodos de filtragem DME e DTWL, que foram implementados em linguagem FORTRAN.

#### 3.1 Descrição do dado utilizado

A Bacia do Tacutu está situada, geograficamente, numa região de fronteira entre o Brasil, nordeste do Estado de Roraima, e da Guiana, distrito de Upper Takutu-Upper Essequibo, sua área total abrange cerca de 12.500  $km^2$ .

Nos anos 80 a PETROBRAS realizou na região uma série de levantamentos sísmicos 2D com o objetivo de se iniciar a exploração de hidrocarbonetos naquela região. Atualmente, algumas dessas linhas foram adquiridas junto à Agência Nacional do Petróleo pela Universidade Federal da Bahia que utiliza as mesmas em atividades de pesquisa e formação de alunos. Dentre as linhas adquiridas, a linha 204-RL-247 foi utilizada na aplicação da metodologia de filtragem proposta no presente trabalho, as informações sobre a aquisição da

Bacia	Tacutu
Localização	Roraima, Brasil
Lanço	3850 - 100 - 0 - 100 - 1050 $m$
Cobertura	4800%
Número de canais	96
Distância entre canais	50 $m$
Distância entre pontos de tiro	50 $m$
Intervalo de amostragem	4 $ms$
Tempo de Registro	4 $s$

Tabela 3.1: Tabela contendo as informações de aquisição da linha 204-RL-247.

linha estão presentes na Tabela 3.1.

Na linha bruta foi aplicado o fluxograma de processamento da Figura 3.1, nesse fluxograma não é adotado nenhum método de filtragem de ruídos. O *supergather* (Figura 3.2) foi formado a partir de cinquenta famílias CMPs com o objetivo de aumentar a cobertura de traços e propiciar uma melhor definição dos pontos de coerência no respectivo *semblance*. A partir da marcação desses picos é possível estimar a velocidade de NMO das camadas (velocidade que consegue corrigir o atraso de chegada da onda devido ao afastamento fonte-receptor, horizontalizando os eventos hiperbólicos em uma família CMP).



Figura 3.1: Fluxograma que descreve as etapas de processamento envolvidas na construção da seção empilhada bruta.

No caso do dado bruto, o *ground roll* contamina o *supergather* dificultando a atuação do algoritmo que rastreia as amplitudes para a geração dos gráficos de *semblance*. A seção empilhada (Figura 3.3) também exhibe uma baixa frequência, característica do ruído, que se sobrepõe às reflexões de interesse. Os métodos de filtragem propostos tem o objetivo de amenizar esses problemas.

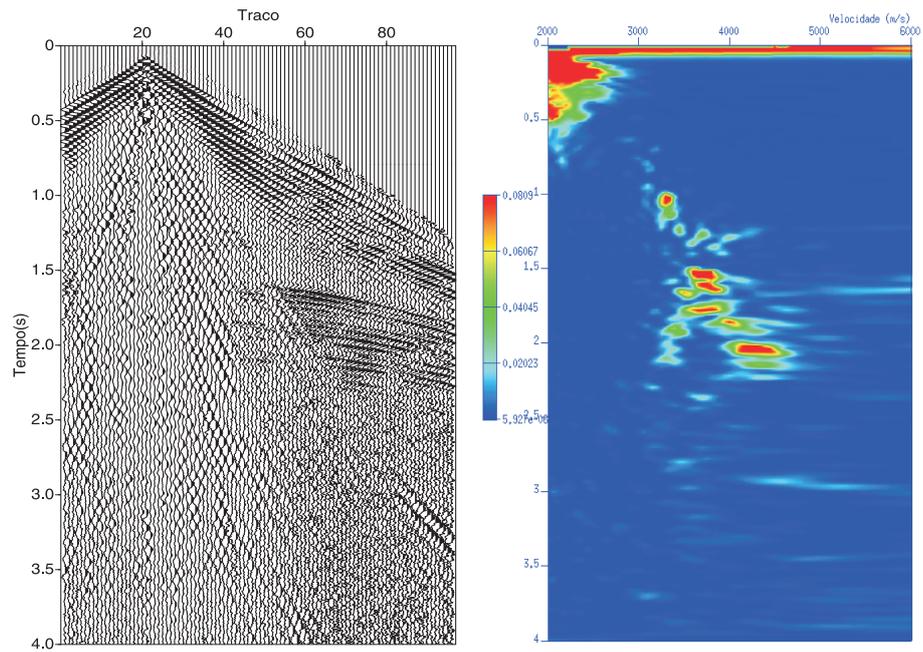


Figura 3.2: *Supergather* de cinquenta CMPs da linha bruta e seu respectivo *semblance*.

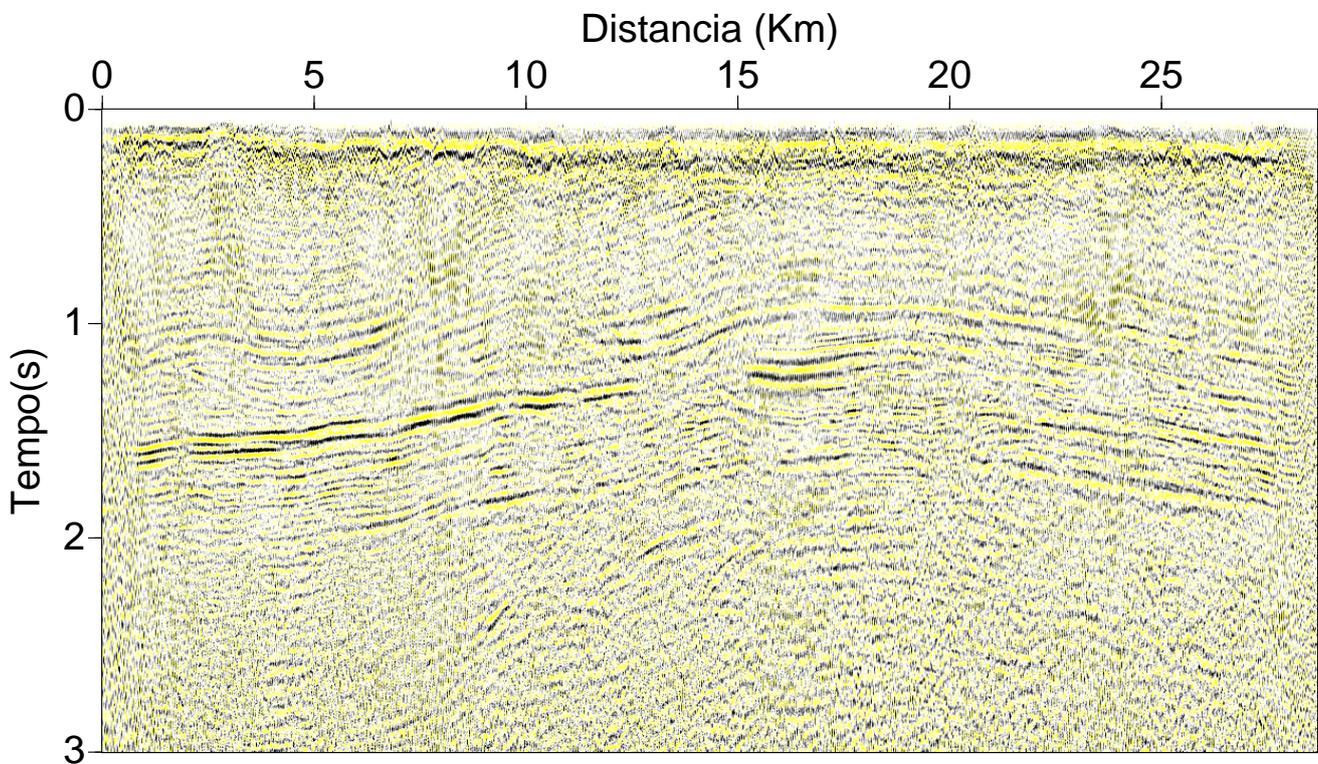


Figura 3.3: Trecho da seção original, empilhada sem nenhum método de filtragem.

## 3.2 Aplicação do filtro passa-banda

A filtragem passa-banda é muito utilizada pela indústria, sua aplicação é simples e rápida. O primeiro passo da sua aplicação é estabelecer as frequências que compõe o trapézio (Seção 2.1). Como o objetivo principal é atenuar o *ground roll* as frequências de corte inicial devem ser baixas (características do ruído), levando em consideração esse conhecimento e analisando o espectro de amplitude do sismograma de entrada na Figura 3.6 as frequências escolhidas para compor o trapézio foram 10, 20, 50, 60 *Hz*.



Figura 3.4: Fluxograma de processamento utilizado na aplicação da filtragem passa-banda

O sismograma filtrado da Figura 3.5 e o seu espectro de amplitude demonstram que a escolhas das frequências que compõe o trapézio foram satisfatórias, pois o ruído foi fortemente suprimido. Porém, no espectro de amplitude do sismograma filtrado podemos perceber que as frequências abaixo de 10 *Hz* foram completamente eliminadas (o que já era esperado), no entanto se houver reflexões de interesse entre essas bandas frequência, elas serão eliminadas do dado filtrado, prejudicando assim etapas posteriores do processamento e de interpretação.

O *supergather* formado a partir de cinquenta famílias CMPs do dado filtrado (Figura 3.7) demonstra uma atenuação significativa do *ground roll*, fato que explica a melhora nos picos de coerência do *semblance* (espectro de velocidades), quando comparado com o dado original (seção 3.1). A seção empilhada exibe uma melhora na continuidade dos refletores, principalmente aqueles de maior frequência e menor amplitude, que são muito afetados pelo ruído.

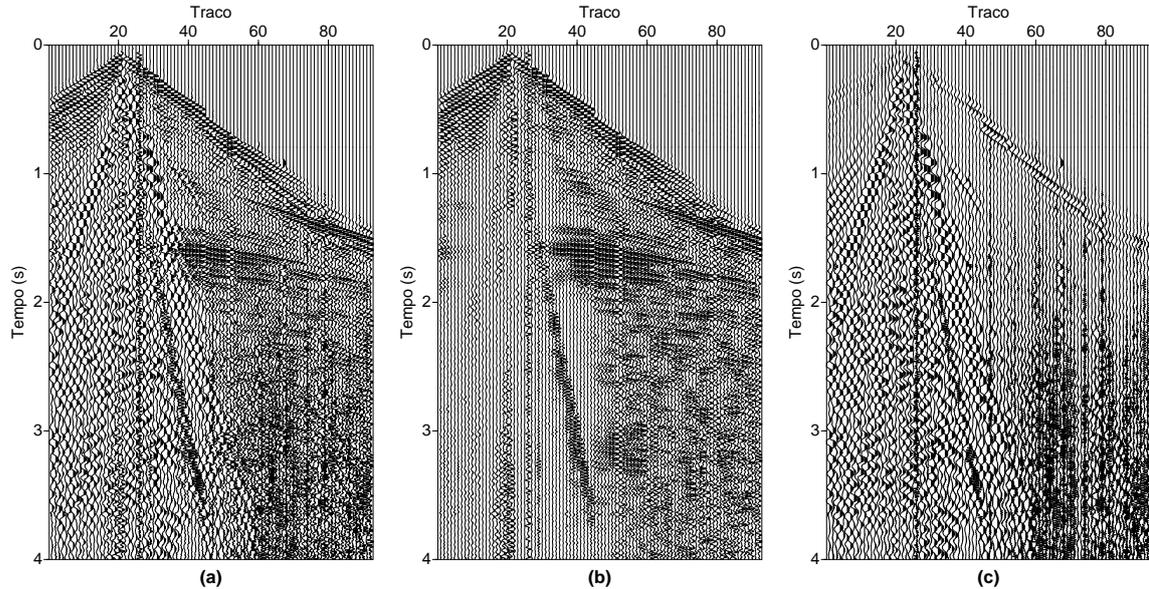


Figura 3.5: Sismograma original em (a), após a filtragem passa-banda em (b) e resíduo entre os sismogramas anteriores em (c).

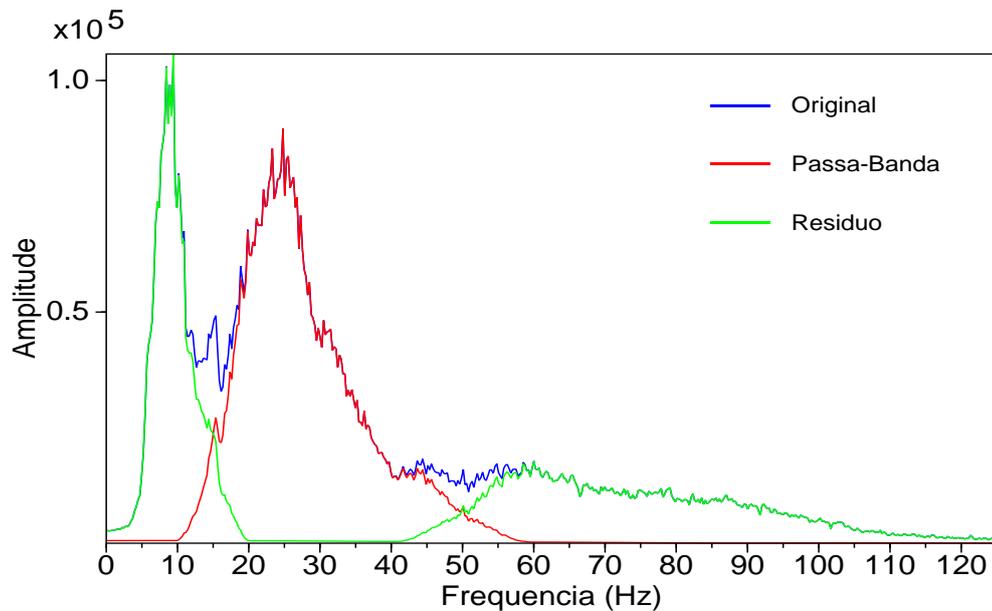


Figura 3.6: Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, após a filtragem passa-banda em vermelho e resíduo em verde.

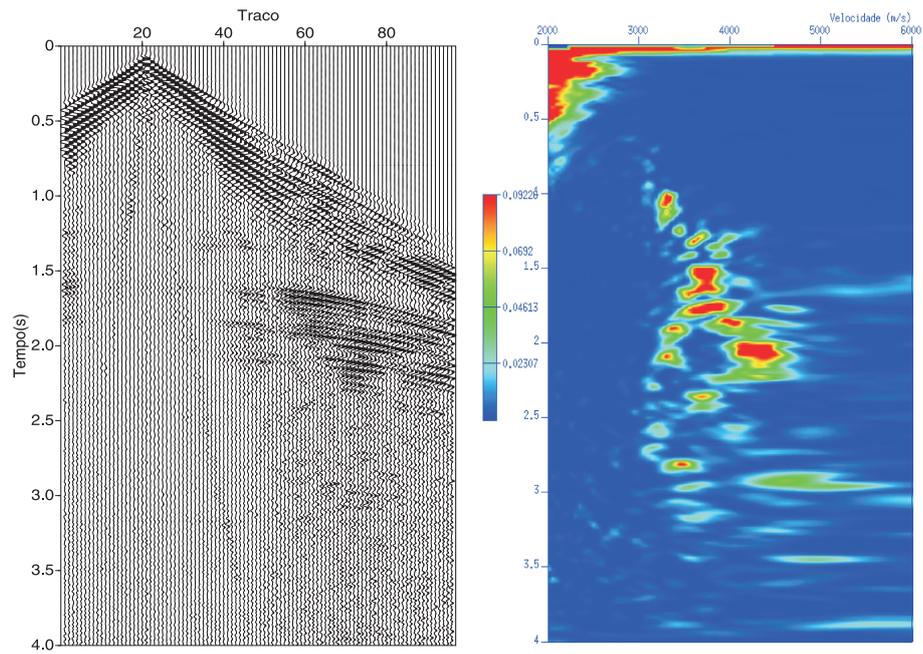


Figura 3.7: *Supergather* de cinquenta CMPs do dado filtrado com o método passa-banda e seu respectivo *semblance*.

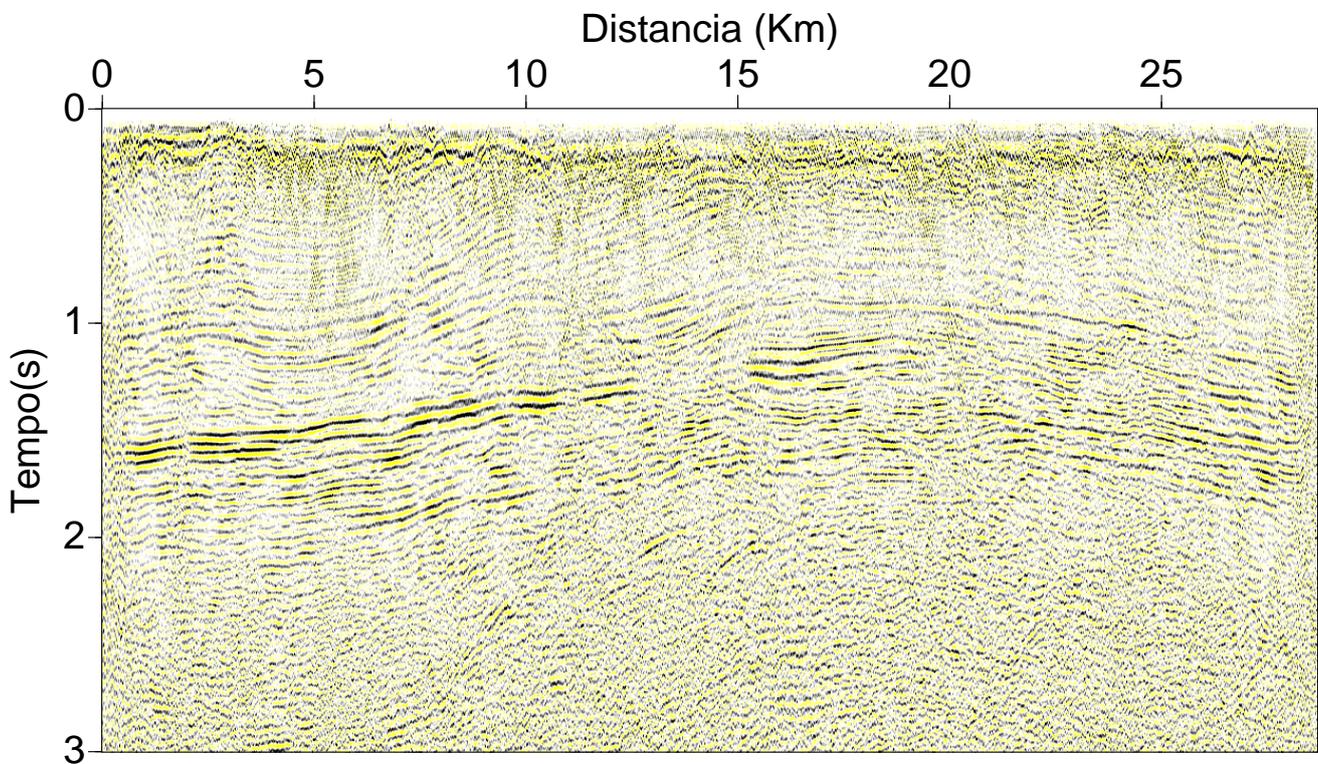


Figura 3.8: Trecho da seção empilhada filtrada com o filtro passa-banda.

### 3.3 Aplicação do método de deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson

O método de deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson é utilizado, principalmente, para aumentar a resolução temporal dos dados, porém ao realizar esse procedimento utilizando além do filtro causal, o filtro não causal (método DTWL), a frequência dos dados aumenta de tal maneira que podemos atenuar o *ground roll* conforme aumentamos a quantidade de coeficientes do filtro.

Além do número de coeficientes do filtro, outro fator a ser considerado no caso da aplicação de uma deconvolução na forma adaptativa é o comprimento da janela móvel. Na Figura 3.9 é apresentado o espectro de amplitude médio do dado original e dos dados deconvolvidos para os comprimentos de janela móvel de 10, 20 e 50 amostras.

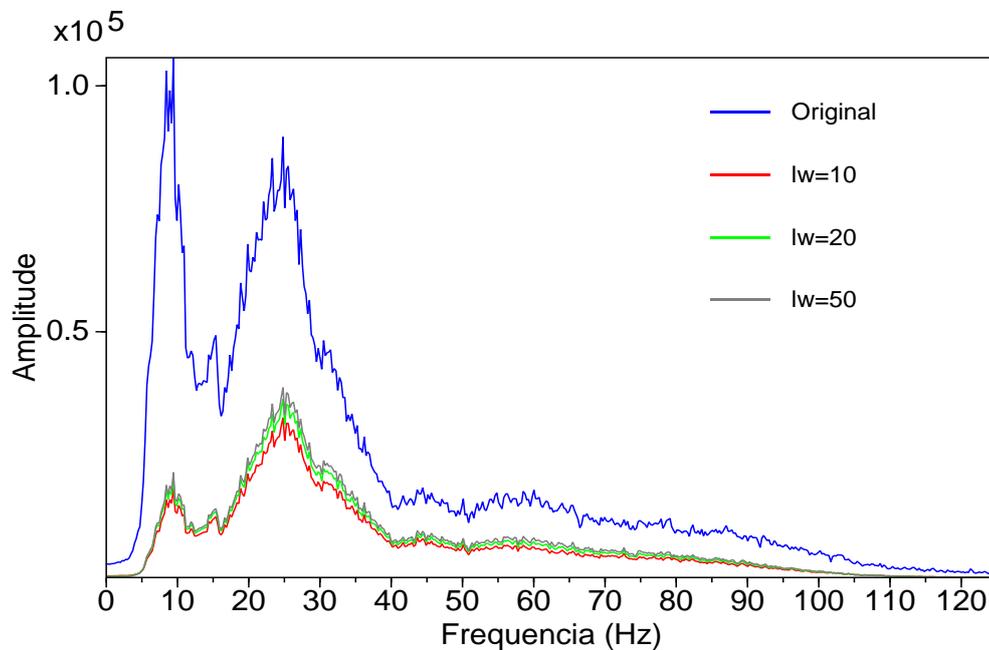


Figura 3.9: Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, deconvolvido com janela móvel de 10 amostras em vermelho, 20 amostras em verde e 50 amostras em cinza.

De acordo com os resultados obtidos na aplicação dos diversos comprimentos de janela ao dado, é possível concluir que quanto menor o tamanho da janela móvel, maior é a atenuação do ruído, porém essa atenuação também é observada no sinal de interesse, por isso, para a execução dos passos posteriores foi utilizada uma janela com comprimento de cinquenta amostras.

O método de deconvolução adaptativa da Wiener-Levinson foi inserido no fluxograma de processamento indicado na Figura 3.10 e foi aplicado em duas etapas, na primeira foi utilizado um filtro com apenas um coeficiente e posteriormente foi adicionado outro coeficiente, para

que fosse possível comparar os resultados obtidos e escolher a quantidade de coeficientes ideal para a linha de trabalho.



Figura 3.10: Fluxograma que descreve as etapas de processamento na aplicação do método de deconvolução de Wiener-Levinson.

A Figura 3.11 mostra o resultado das aplicações do método DTWL, quando utilizamos o filtro com apenas um coeficiente, o *ground roll* é atenuado, porém ele ainda coexiste com as reflexões de uma forma significativa nos sismogramas. Quando é utilizado dois coeficientes no filtro, observamos uma boa atenuação do ruído, porém ele é muito severo e acaba atenuando as reflexões primárias e ressaltando um ruído aleatório de alta frequência existente no dado.

O espectro de amplitude médio, apresentado na Figura 3.12, demonstra a eficiência da aplicação dos filtros de deconvolução para atenuar o *ground roll*. Eles removeram uma boa parte das amplitudes correspondentes as frequências características do ruído (10 à 12  $Hz$ ), porém é possível observar também o quanto o filtro de dois coeficientes foi agressivo com as reflexões de interesse, que exibem uma frequência característica entre 20 e 50  $Hz$ .

Devido aos problemas exibidos na aplicação do método DTWL com o filtro de dois coeficientes, foi utilizado o filtro de um coeficiente para que o restante das etapas de processamento, apresentados no fluxograma da Figura 3.10, fossem executadas, gerando assim uma seção empilhada.

O *supergather* formado a partir de cinquenta famílias CMPs do dado deconvolvido (Figura 3.13), demonstra uma atenuação discreta do *ground roll*, com uma consequente melhora

do espectro de velocidade e dos picos de coerência. Na seção empilhada (Figura 3.14), podemos perceber um aumento da resolução temporal e o aparecimento de algumas reflexões antes mascaradas pelo *ground roll*, porém o ruído ainda persiste dificultando um aumento expressivo da coerência dos refletores.

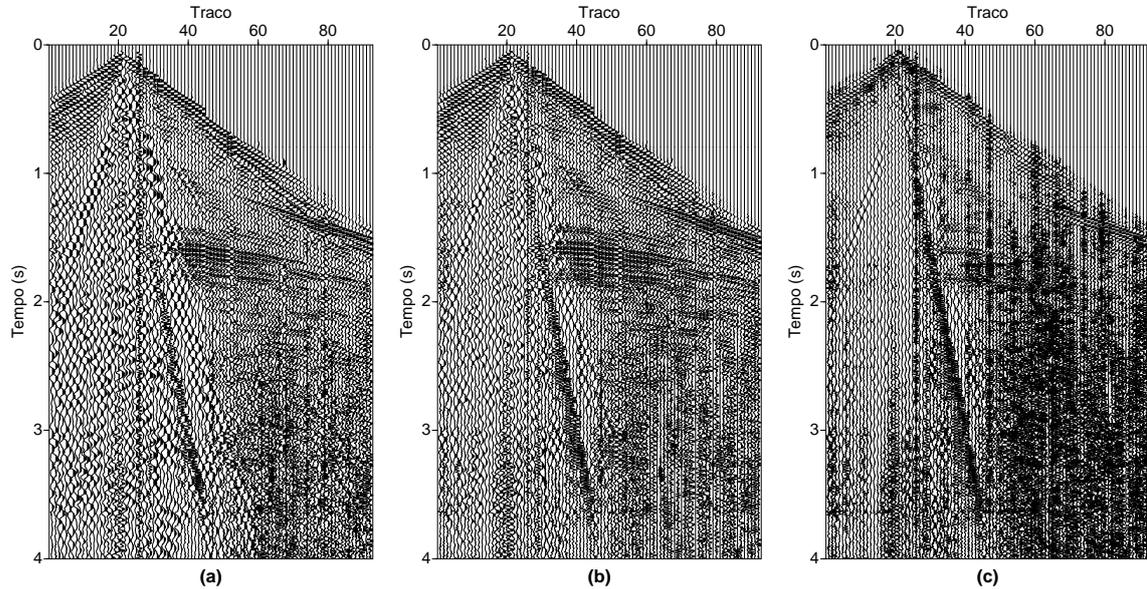


Figura 3.11: Sismograma original em (a), após a deconvolução WL utilizando filtro de um coeficiente em (b) e com dois coeficientes em (c).

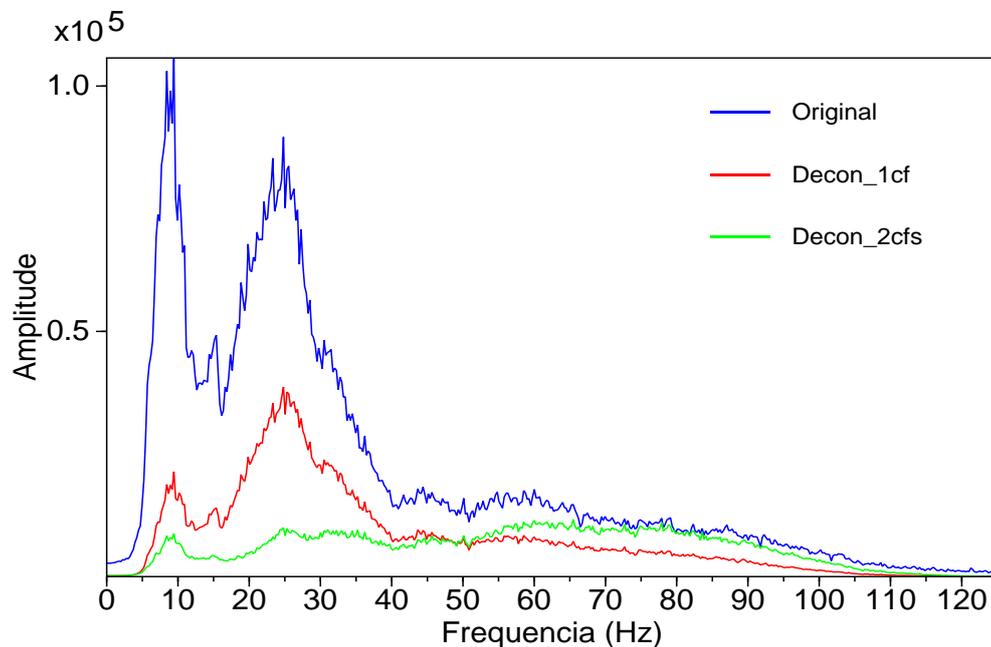


Figura 3.12: Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, deconvolvido com filtro de um coeficiente em vermelho e deconvolvido com filtro de dois coeficientes em verde.

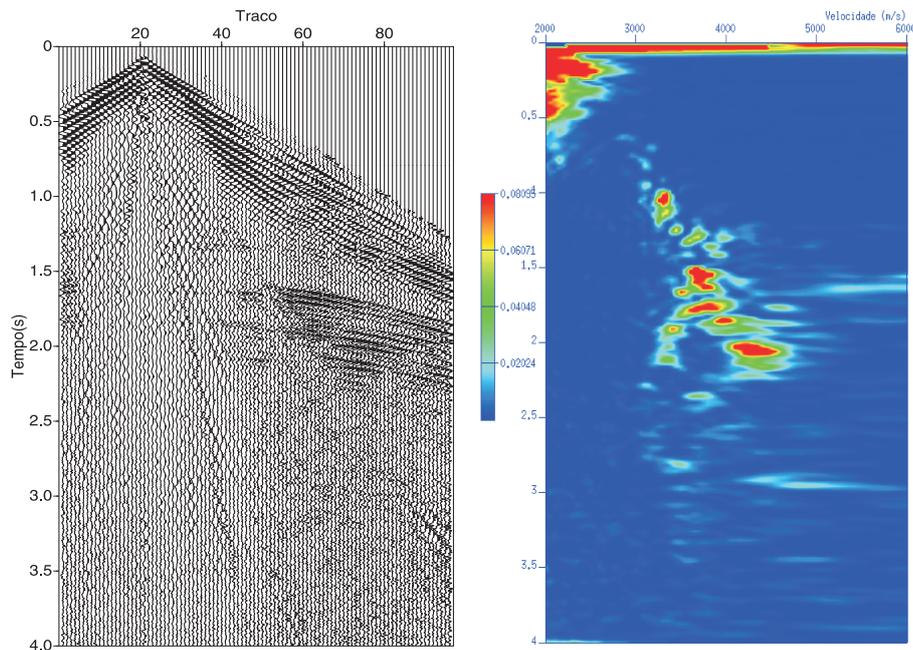


Figura 3.13: *Supergather* de cinquenta CMPs do dado filtrado com o método DTWL e seu respectivo *semblance*.

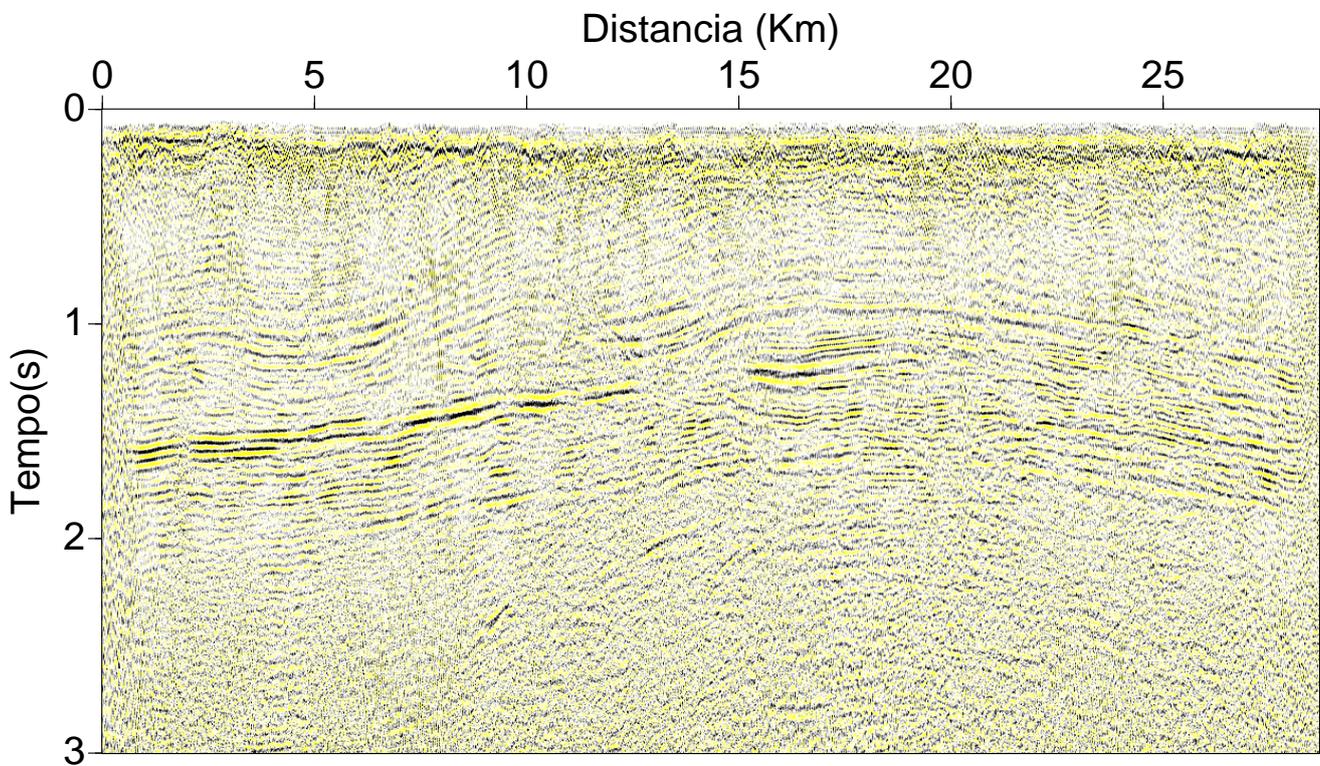


Figura 3.14: Trecho da seção empilhada filtrada com o método DTWL, utilizando filtro de apenas um coeficiente.

### 3.4 Aplicação do método DME no domínio do Tempo

A aplicação do método DME no domínio do tempo é simples e consiste em decompor cada traço em FMIs mais resíduo, cada FMI apresenta uma frequência característica, e cabe ao processador analisá-las e escolher as que melhor se ajustam aos objetivos de atenuação do ruído. O fluxograma de processamento utilizado é ilustrado na Figura 3.15, na etapa de filtragem foram extraídas quatro FMIs (Figura 3.16), das quais as duas primeiras foram escolhidas para compor o dado filtrado (Figura 3.18).



Figura 3.15: Fluxograma que descreve as etapas de processamento na aplicação do método DME no domínio do tempo.

O espectro da Figura 3.17 demonstra o conteúdo de frequência de cada uma das quatro FMIs extraídas. Ao analisarmos podemos notar que, segundo a teoria determina, as primeiras FMIs extraídas apresentam um maior conteúdo de frequência enquanto que as últimas um menor conteúdo.

Na Figura 3.19 é apresentado o espectro de amplitude médio dos sismogramas da Figura 3.18. A análise do espectro e a visualização dos sismogramas nos permite concluir que houve uma atenuação significativa do *ground roll* nos dados, ou seja, os picos de amplitude entre 10 e 12 Hz (característicos do ruído) vistos no espectro do dado original são reduzidos no espectro do dado filtrado.

A seção empilhada após a filtragem DME (Figura 3.21), demonstra o realce nos refletores de alta frequência, antes mascaradas pelo *ground roll*. Um aumento da coerência dos refletores também pode ser notado, porém o ruído não foi completamente eliminado e ainda aparece de uma forma discreta na seção empilhada final.

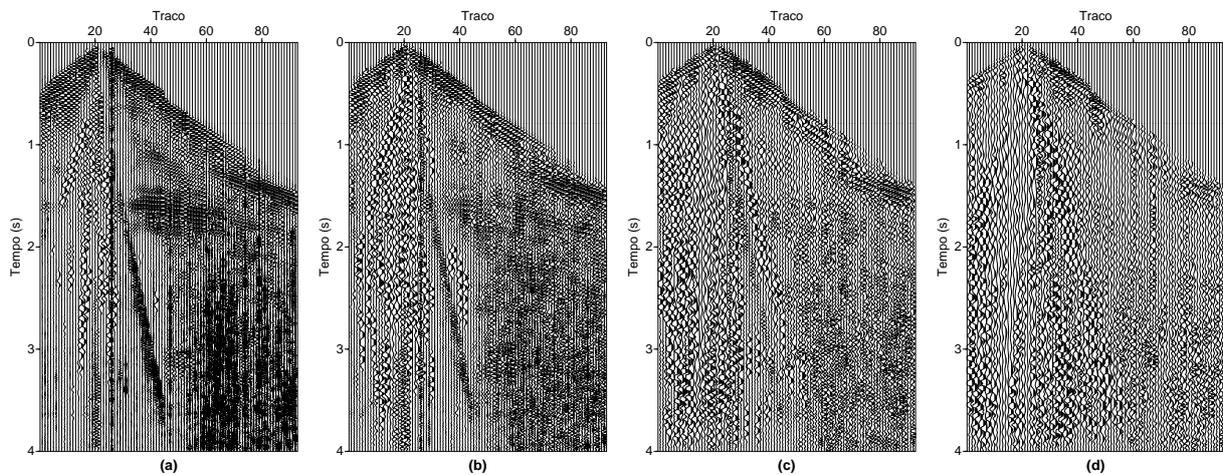


Figura 3.16: As quatro primeiras FMIs extraídas em (a), (b), (c) e (d) respectivamente.

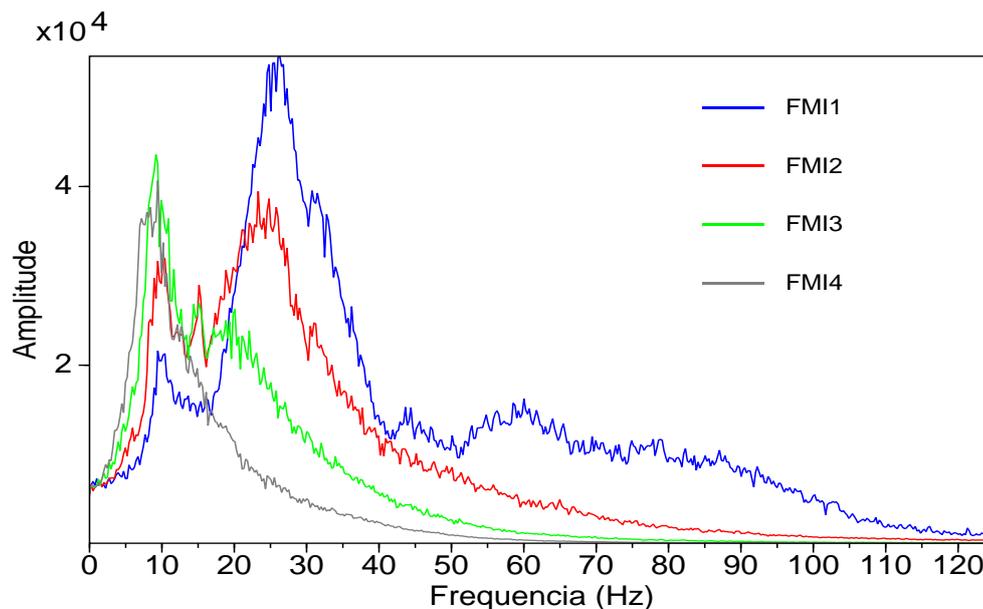


Figura 3.17: Espectro de amplitude médio. 1° FMI em azul, 2° FMI em vermelho, 3° FMI em verde e 4° FMI em cinza.

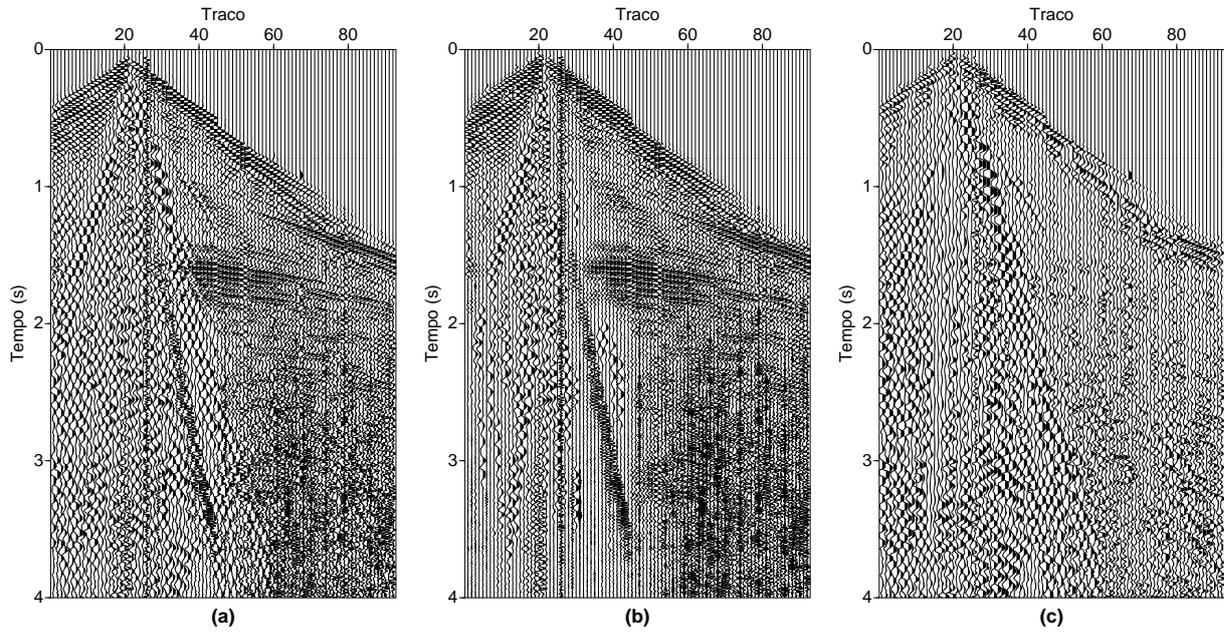


Figura 3.18: Sismograma original em (a), soma das duas primeiras FMIs em (b) e resíduo em (c).

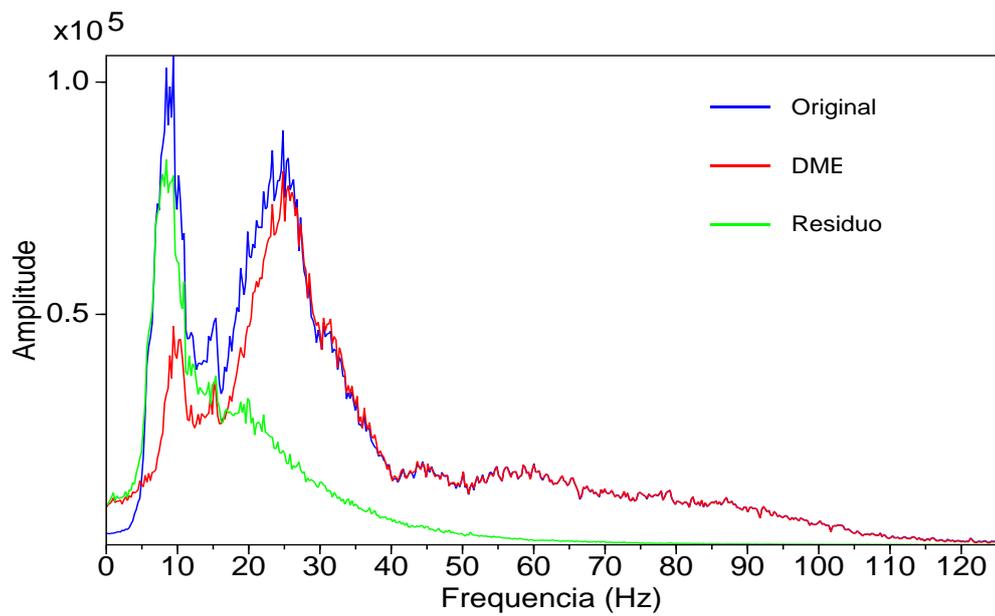


Figura 3.19: Espectro de amplitude médio. Dado original em azul, soma das duas primeiras FMIs em vermelho e resíduo em verde.

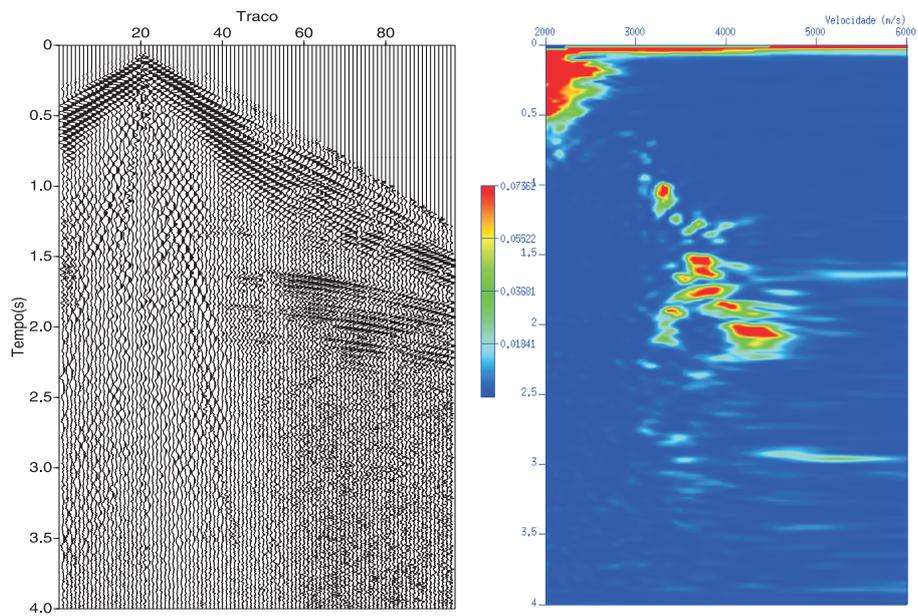


Figura 3.20: *Supergather* de cinquenta CMPs do dado filtrado com o método DME e seu respectivo *semblance*.

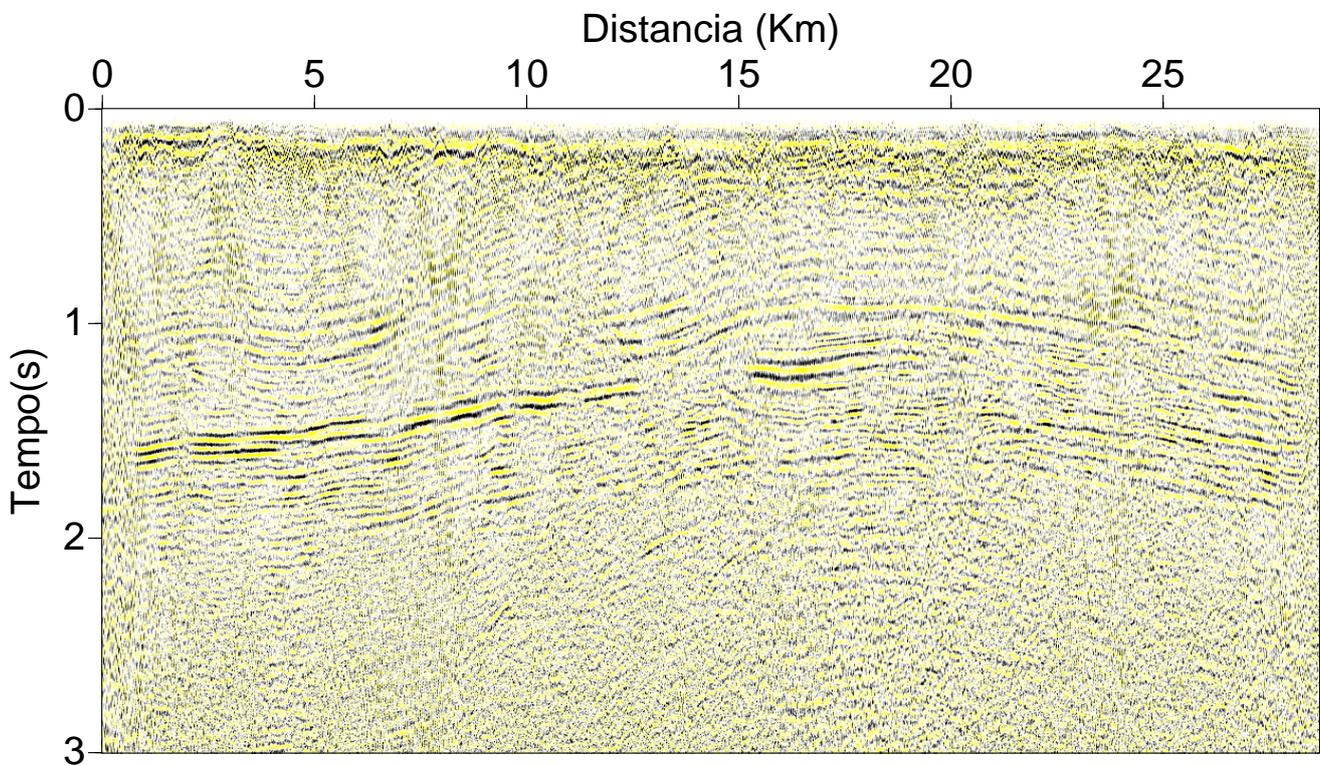


Figura 3.21: Trecho da seção empilhada filtrada com o método DME, soma das duas primeiras FMIs, no domínio do tempo.

### 3.5 Aplicação conjunta dos métodos DME e de deconvolução adaptativa tipo Wiener-Levinson

No intuito de obter resultados ainda melhores na atenuação do *ground roll*, a aplicação do método DME foi feita em conjunto com o DTWL. Os dois métodos se aproveitam das diferentes características do ruído para identificá-lo e atenuá-lo de uma forma muito eficaz.



Figura 3.22: Fluxograma que descreve as etapas de processamento na aplicação conjunta dos métodos DME e DTWL no domínio do tempo.

A primeira aplicação a ser feita foi a do método DTWL. Ele aumenta a frequência do dado permitindo que, posteriormente, a aplicação do método DME encontre e capture as reflexões de interesse logo nas primeiras FMIs, criando uma melhor distinção entre as FMIs que contenham a parte interessante e útil para o processamento e as que contenham somente ruído desprezível. Assim foram obtidas as quatro primeiras FMIs ilustradas na Figura 3.23.

Visualmente é possível notar que as três primeiras FMIs apresentam uma alta razão sinal/ruído, enquanto na quarta essa razão é baixíssima, portanto para compor o dado filtrado

foram escolhidas as três primeiras FMIs que foram somadas e submetidas ao fluxograma de processamento indicada na Figura 3.22.

Os sismogramas resultado da aplicação dos métodos estão apresentados na Figura 3.25, nela é possível notar que a escolha de somar as três primeiras FMIs foi muito satisfatória, já que a razão sinal/ruído do resíduo é muito baixa, ou seja, o método DME conseguiu eliminar grande parte dos resquícios de ruído deixados pelo método DTWL.

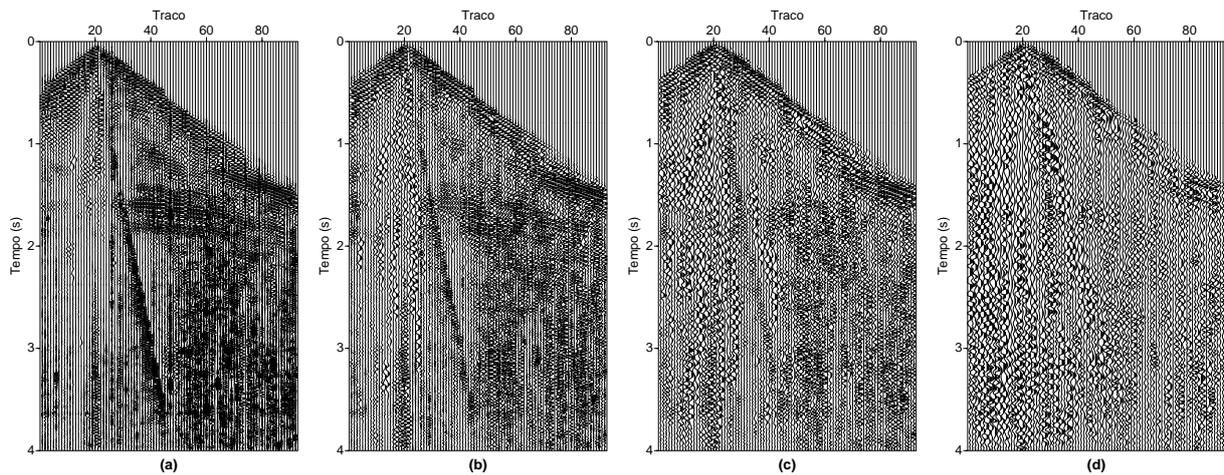


Figura 3.23: As quatro primeiras FMIs extraídas após a deconvolução em (a), (b), (c) e (d) respectivamente.

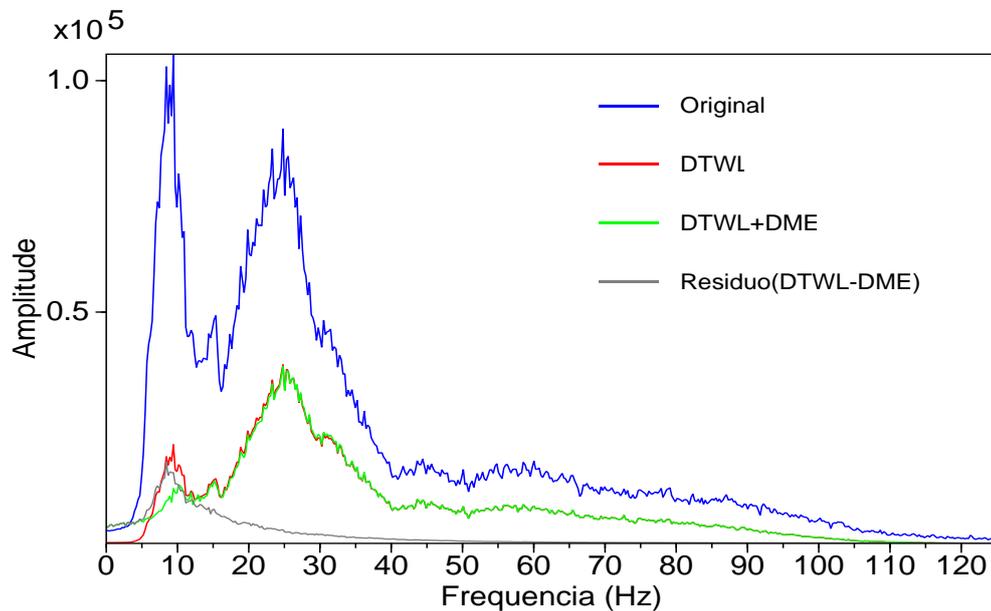


Figura 3.24: Espectro de amplitude médio. Dado original azul, após a deconvolução em vermelho, após a aplicação do método DME em verde e resíduo obtido entre a deconvolução e o método DME em cinza.

O espectro de amplitude ilustrado na Figura 3.24 mostra que logo após a deconvolução o *ground roll* tem suas amplitudes fortemente atenuadas (esse resultado já era conhecido

da Seção 3.3), porém ainda persiste no dado flutuações do ruído, o método DME então se encarrega de localizar, extrair e eliminar grande parte desses resquícios, sendo o resíduo, apresentado nesse mesmo espectro, exatamente o que o método DME conseguiu remover do dado já deconvolvido.

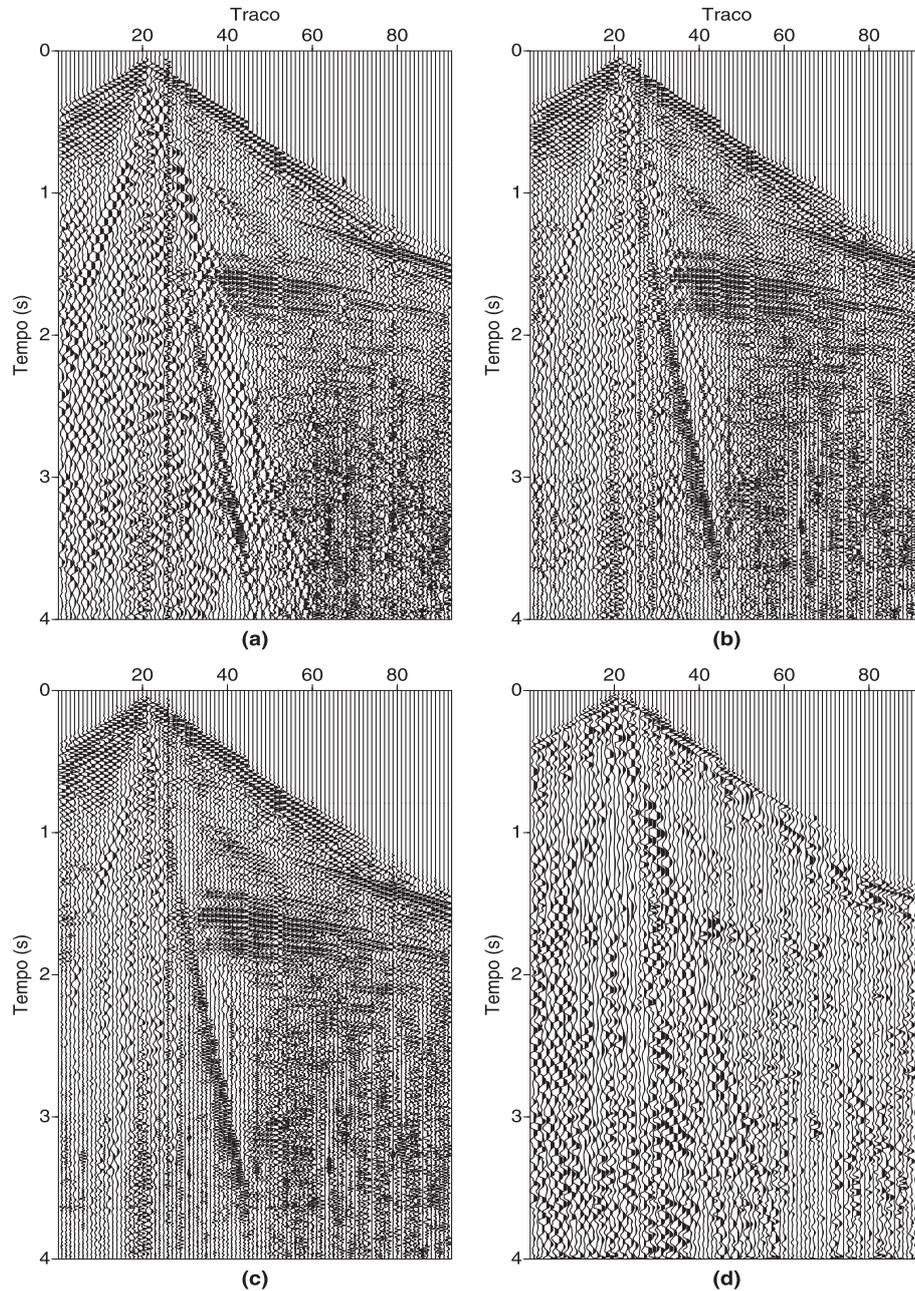


Figura 3.25: Sismograma original em (a), após a deconvolução em (b), após a soma das três primeiras FMIs em (c) e a diferença entre os sismogramas (b) e (c) em (d) respectivamente.

A partir do espectro de amplitude, também é possível observar que após a aplicação do método DME, utilizando as três primeiras FMIs, a curva que representa o dado filtrado praticamente acompanha a curva do dado deconvolvido, excetuando-se nas zonas integrantes

da banda de frequência do ruído.

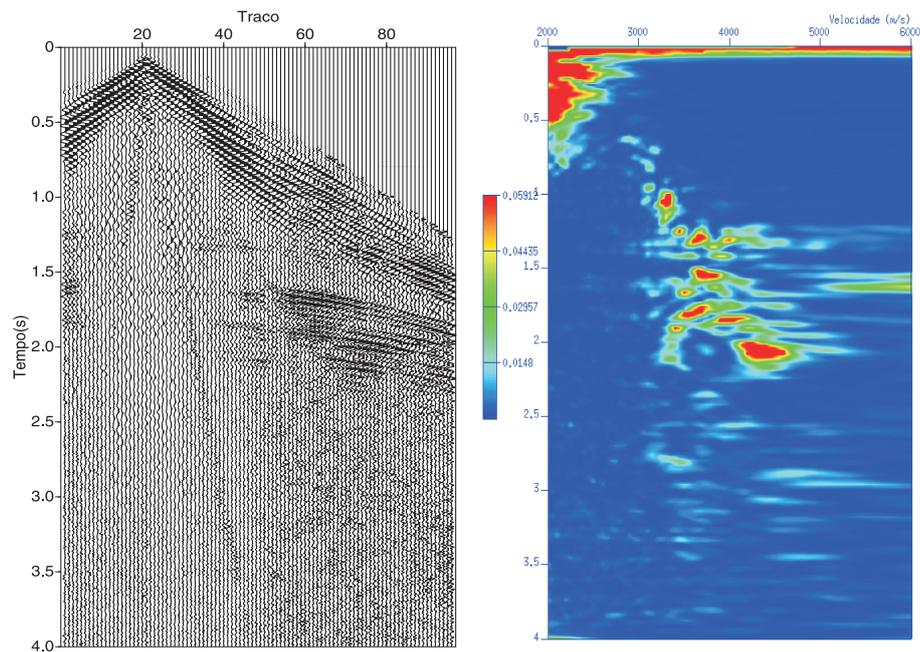


Figura 3.26: *Supergather* de cinquenta CMPs do dado filtrado com os métodos DTWL e DME e seu respectivo *semblance*.

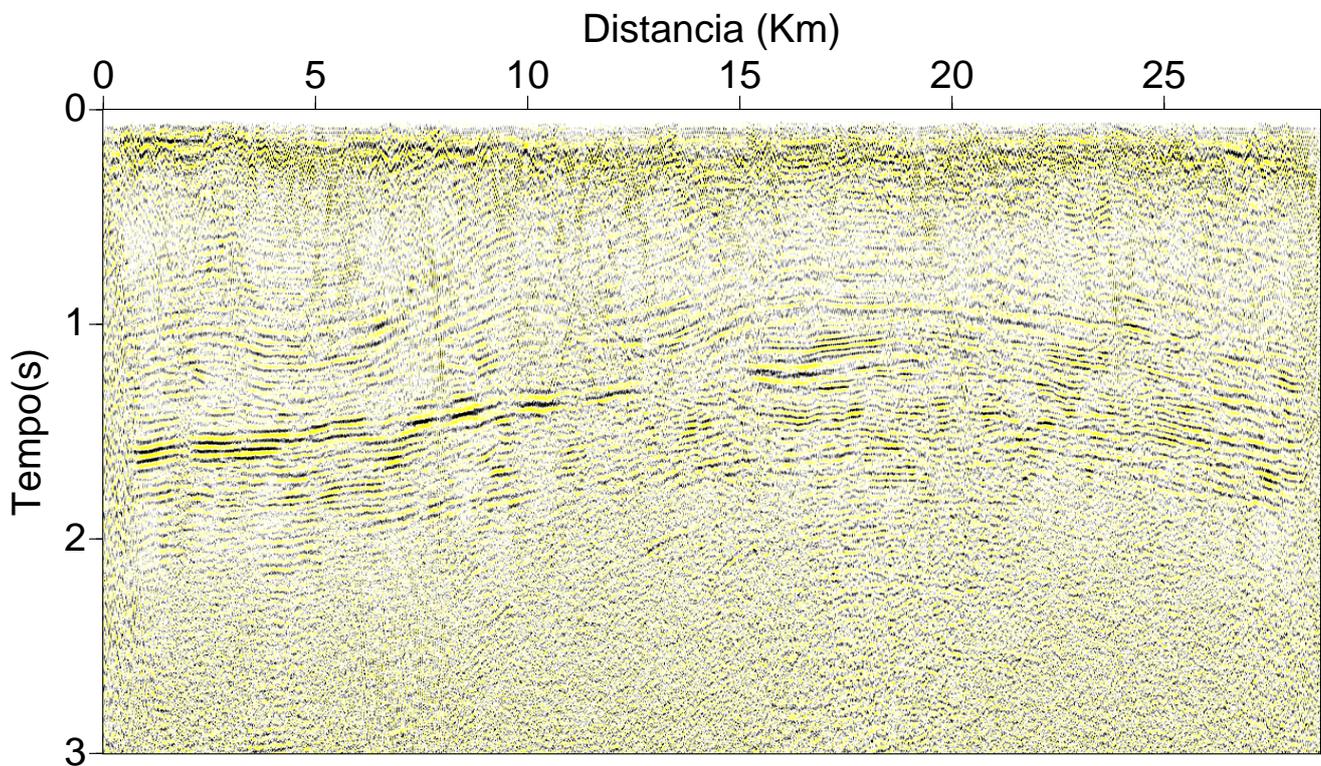


Figura 3.27: Trecho da seção empilhada filtrada com os métodos DTWL e DME, soma das três primeiras FMIs, no domínio do tempo.

## CAPÍTULO 4

### Conclusões

A filtragem é uma importante etapa do processamento sísmico, ela possibilita a remoção de ruídos que atrapalham o processamento e a interpretação dos dados. Dentre os ruídos mais conhecidos, o *ground roll* tem destaque em sismogramas terrestres, pois devido as suas características, ele se superpõe as reflexões de interesse mascarando as mesmas.

Os métodos de filtragem existentes se aproveitam das características do ruído, como frequência e amplitude, para localizá-lo e extraí-lo dos sismogramas, porém muitas vezes eles são muito severos e eliminam partes proveitosas do dado. Com o intuito de amenizar esse problema muitos pesquisadores propõem novos métodos que procuram transpor essas dificuldades.

O método de Decomposição em Modos Empíricos é uma nova técnica de tratamento de sinais, proposto por Huang et al. (1998) que detecta variações no comportamento oscilatório dos dados com o intuito de extrair suas FMIs, essas funções podem ser manipuladas de modo que permaneça no dado só aquelas que realmente interessem para a construção da imagem sísmica. Sua aplicação em dados da Bacia do Tacutu demonstrou uma melhora no espectro de amplitude médio e na seção final, porém o ruído ainda permaneceu de forma consistente nos dados.

O método de deconvolução de Wiener-Levinson a princípio tem o objetivo de comprimir a forma do pulso sísmico e aumentar a resolução temporal dos dados sísmicos, esse processo por si só aumenta a frequência dos dados atenuando o ruído *ground roll* de uma forma discreta. No entanto, é possível se fazer alterações no processo para que a partir dos filtros causal e anticausal se construa outro filtro com características de antissimetria, que quando aplicado de forma adaptativa pode ser uma boa alternativa para a atenuação do *ground roll*.

A aplicação dos filtros antissimétricos de Wiener-Levinson demonstrou uma boa eficácia em atenuar o ruído quando aplicado nos dados reais, porém esses resultados podem ser otimizados se em conjunto com o processo deconvolutivo for aplicado o método DME. O resultado dessa aplicação conjunta foi muito satisfatório visto que os espectros de amplitude apresentaram uma queda significativa nos picos entre 10 e 12 *Hz* (característicos do ruído) e os gráficos de *semblance* um aumento nos picos de coerência, facilitando assim a estimação da velocidade de empilhamento.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que essa nova metodologia de filtragem, que associa os métodos de deconvolução DTWL e DME, é eficaz na redução do ruído *ground roll* em dados sísmicos, além de ser simples, de fácil aplicação (filtragem traço à traço) e tem um custo computacional baixo. Porém, deve ser aperfeiçoada para que sejam obtidos resultados ainda mais significativos, já que ela ainda apresenta algumas limitações.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por sempre iluminar o meu caminho.

Aos meus pais, por todo amor, carinho e confiança, sem eles nada disso seria possível.

Aos meus avós, que sempre me acolheram fornecendo suporte afetivo indispensável na minha formação.

Aos meus padrinhos, que sempre estiveram dispostos a me ajudar e a minha tia Valéria pelo cuidado e dedicação.

Ao meu orientador Milton Porsani e a Michelângelo, que com muita experiência e competência me passaram ensinamentos que levarei tanto para minha vida profissional quanto pessoal.

Aos meus amigos, por estarem presentes em vários momentos marcantes da minha vida e aos colegas de turma pela ajuda e cumplicidade durante todos esses anos.

Aos professores, pela experiência e ensinamentos; em especial aos professores Amin e Figueiró pela grande ajuda nessa etapa de conclusão do curso.

Ao INCT-GP/CNPq e ao PFRH/PETROBRAS, pelo apoio financeiro dado através de bolsas de iniciação científica.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

# Referências Bibliográficas

- Amorim, F. Z. (2009) Atenuação de ruídos coerentes utilizando Decomposição em Modos Empíricos, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
- Bekara, M. e Baan, M. V. (2007) Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data, *Geophysics*, (72):59–65.
- Berkhout, A. J. (1977) Least squares inverse filtering and wavelet deconvolution, *Geophysics*, (42):1369–1383.
- Brooks, M.; Kearey, P. e Hill, I. (2009) Geofísica de exploração, Oficina de textos.
- Duarte, O. O. (2003) Dicionário enciclopédico inglês-português de Geofísica e Geologia, Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro.
- Ferreira, L. E. S. (2010) Aplicação do método de Decomposição em Modos Empíricos na atenuação do ruído de rolamento em dados sísmicos, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba.
- Huang, N. E.; Shen, Z.; Long, S. R.; Wu, M. C.; Shih, H. H.; Zheng, Q.; Yen, N. C.; Tung, C. C. e Liu, H. H. (1998) The empirical mode decomposition and hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series, *Royal Society London*, (454):903–995.
- Milson, J. (2003) *Field Geophysics*, The geological field guide series, John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Miranda, R. G. (2011) Atenuação de reflexões múltiplas na região do talude continental utilizando deconvolução preditiva adaptativa, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, <http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/Rodrigo-Miranda.pdf>.
- da Mota Alves, F. e Porsani, M. J. (2012) Atenuação do *ground roll* utilizando os métodos de deconvolução adaptativa de Wiener-Levinson e Decomposição em Modos Empíricos, 5º Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador-BA.
- da Mota Alves, F.; da Silva, M. G. e Porsani, M. J. (2011) Filtragem de eventos lineares utilizando os métodos da Transformada Radial e Decomposição em Modos Empíricos, 12º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro-RJ.
- Porsani, M. J. (2010) Deconvolução do pulso sísmico, Notas de aula, Universidade Federal da Bahia.

- dos Santos, Q. C. (2007) Atenuação do *ground roll* utilizando filtro não causal tipo Wiener-Levinson, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, <http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/QueziaCavalcante.pdf>.
- Shepard, D. (1968) A two-dimensional interpolation for irregularly-spaced data, ACM national conference, (23).
- Sheriff, R. E. e Geldart, L. P. (1995) Exploration Seismology, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- da Silva, M. G. (2004) Processamento de Dados Sísmicos da Bacia do Tacutu, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, <http://www.pggeofisica.ufba.br/media/uploads/publicacoes/182.pdf>.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P. e Sheriff, R. E. (1990) Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Yilmaz, O. (2001) Seismic Data Analysis, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, U.S.A.
- Zegadi, A. e Zegadi, K. K. (2009) Coherent and random noise attenuation using the intrinsic timescale decomposition, SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting.