



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



GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ATENUAÇÃO DO *GROUND ROLL*
UTILIZANDO FILTRAGEM
ADAPTATIVA SVD NO DOMÍNIO DA
FREQUÊNCIA E
DECONVOLUÇÃO ITERATIVA
COM NORMA L_p

RAFAELA REIS LIMA

SALVADOR – BAHIA
DEZEMBRO – 2014



Atenuação do *Ground Roll* utilizando Filtragem Adaptativa SVD no Domínio da Frequência e Deconvolução Iterativa com Norma L_p

por

RAFAELA REIS LIMA

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

Dr. Milton José Porsani (Orientador)

Dr. Wilson Mouzer Figueiró

Msc. Michelângelo Gomes da Silva

Data da aprovação: 16/12/2014

"L'avenir a plusieurs noms : pour les
faibles, il se nomme l'inaccessible.

Pour les peureux, il se nomme
l'inconnu. Pour les courageux, il se
nomme opportunité."

Victor Hugo

Aos meus tesouros, Josineide Reis e
Gabriela Andrade.

RESUMO

A atenuação do *ground roll* constitui grande desafio para o processamento de dados sísmicos, e está diretamente relacionada a qualidade da seção sísmica obtida. Muito comum em dados sísmicos terrestres, seu efeito é o de reduzir a razão sinal/ruído nesses tipos de dados. Possui baixa frequência, alta amplitude e se propaga nas camadas mais superficiais da terra com baixa velocidade. Este trabalho apresenta formas de filtragens alternativas, resultantes da filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência com a deconvolução iterativa com norma L_p (DIL_p).

A filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência (SVD_{df}) atua na banda de frequência média na qual o *ground roll* se manifesta. Na qual, são coletados um subconjunto de traços no domínio da frequência, que geram o espectro SVD, com conteúdo de frequência na região do ruído. Através da diferença entre o espectro original e o espectro SVD, atenua-se o *ground roll*. O processo pode ser melhorado, por meio do refinamento de cada autoimagem gerada, bem como pelo número de traço coletados. O filtro SVD_{df} melhora significativamente a análise de velocidade, e melhora ainda mais a qualidade da seção quando utilizada com a DIL_p . Resultados interessantes também podem ser vistos quando combinamos o filtro SVD_{df} com filtro F-K (frequência-número de onda).

Os resultados finais mostram que a seção sísmica gerada através das aplicações dos métodos exibem eventos mais nítidos e contínuos lateralmente, assim como apresenta um número maior de reflexões quando comparamos com a seção sísmica original. Podemos ver que tais métodos contribuíram para o aumento da razão sinal/ruído do dado, ilustrado em suas mais diversas formas (sismograma, espectro de amplitude, espectro de velocidade, espectro F-K e seção sísmica), atenuando de forma eficiente o *ground roll*, cuja contribuição se concretiza em uma seção sísmica com maior qualidade.

ABSTRACT

The ground roll attenuation has been a very tough challenge for seismic data processing and it is important for signal enhance of seismic data. This kind of noise is common on land-based seismic acquisitions, it has low frequency, high amplitude and low velocity. In this work, we will present a singular value decomposition filtering (SVD) applied in frequency and an interactive approach for deconvolution based on the L_p norm for ground roll attenuation.

The singular value decomposition filtering applied in frequency approach is performed on a small number of seismic traces at the same band of frequency of the noise. The noise attenuation is the result of the difference between the original frequency and the svd frequency. This approach can be improved by the eigenimages interactions, as well by the selected number of traces. The singular value decomposition filtering improve the velocity analysis and seismic section even more when it's integration with interactive approach for deconvolution based on the L_p norm. There are interesting results with the combination of F-K (frequency-wave number) filtering and SVD filtering method.

The final results show that the filtered stacked seismic section with better definition of reflections, they are laterally continuous and with a more number of reflections when we compared with the results from original stacked seismic section. It is apparent the new approach increased significantly the signal/noise ratio of the seismic data, they are demonstrated by many features in the seismograms, amplitude spectrum, velocity spectrum, F-K spectrum and seismic section. Attenuating in such effective way the ground roll, to make a substantial contribution for enhancement of stacked seismic section.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Filtragem Adaptativa SVD	3
1.1 Introdução	3
1.2 Matrizes de Covariância $\mathbf{XX}^T$ e $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$	4
1.3 Autovalores e Autovetores	4
1.4 Decomposição em Valores Singulares	5
1.5 Filtragem SVD	6
1.6 Filtragem Adaptativa SVD no Domínio da Frequência	8
1.6.1 Etapas do Algoritmo SVD_{df}	9
CAPÍTULO 2 Deconvolução de Dados Sísmicos	11
2.1 Introdução	11
2.1.1 O modelo convolucional do traço sísmico	11
2.1.2 Filtro inverso de um pulso conhecido	13
2.1.3 A deconvolução de Wiener-Levinson	14
2.1.4 Filtro inverso de Wiener-Levinson	14
2.2 Deconvolução Iterativa do Pulso Utilizando Norma L_p	16
2.2.1 Fundamentos Teóricos	17
2.2.2 Linearização da Função Objetivo	17
2.2.3 Solução da Função Linear e Obtenção do Filtro	18
2.2.4 Etapas do Algoritmo DIL_p	19
CAPÍTULO 3 Aplicação dos Métodos DWL e DIL_p em Dados Sintéticos	21
3.1 Deconvolução de um pulso fase mínima	22
3.2 Deconvolução de um pulso fase mista	23
3.3 Deconvolução de um traço sísmico sintético	23

CAPÍTULO 4	Aplicação dos Métodos em Dado Real	28
4.1	Filtros SVD no Domínio da Frequência	29
4.1.1	Analisando os Efeitos do Tamanho da Janela	29
4.1.2	Analisando os Efeitos do Número de Refinamento	31
4.1.3	Atuação em Conjunto da Filtragem SVD_{df} com a Filtragem F-K	34
4.2	Deconvolução WL	36
4.3	Deconvolução Iterativa com Norma L_p	37
4.4	Análise de Velocidade	39
4.5	Seções Empilhadas	43
CAPÍTULO 5	Conclusões	53
Agradecimentos		55
Referências Bibliográficas		56

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1	Deconvolução de um pulso fase mínima: (a) Pulso de fase mínima; (b) Deconvolvido WL e (c) Deconvolvido L_p com $p=1$	22
3.2	Deconvolução de um pulso fase mista: (a) Pulso de fase mista; (b) Deconvolvido WL e (c) Deconvolvido L_p com $p=1$	23
3.3	Deconvolução de um traço sintético: (a) Refletividade; (b) Pulso de fase mínima; (c) Traço sísmico; (d) Deconvolvido WL e (e) Deconvolvido L_p com $p=1$	24
3.4	Deconvolução de um traço sintético: (a) Refletividade; (b) Pulso de fase máxima; (c) Traço sísmico; (d) Deconvolvido WL e (e) Deconvolvido L_p com $p=1$	25
3.5	Deconvolução de um traço sintético: (a) Refletividade; (b) Pulso de fase mista; (c) Traço sísmico; (d) Deconvolvido WL e (e) Deconvolvido L_p com $p=1$	26
3.6	Deconvolução de um traço sintético com diversos valores de p : (a) $p = 2$; (b) $p = 1, 8$; (c) $p = 1, 5$; (d) $p = 1, 3$ e (e) $p = 1$	27
4.1	Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} com $L = 5$; (c) $L = 15$; (d) $L = 25$; (e) $L = 35$ e (f) $L = 95$	30
4.2	Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 3$; (c) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 10$; (d) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 20$; (e) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 30$ e (f) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 40$	32
4.3	Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} $L = 25$ e $N_{ref} = 20$ e (c) Resíduo.	33
4.4	Espectro de amplitude médio: Original, Filtro SVD_{df} com $L = 25$ e $N_{ref} = 20$ e Resíduo.	33
4.5	Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} e (c) Filtro $SVD_{df}+F-K$	35
4.6	Espectro F-K: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} e (c) Filtro $SVD_{df}+F-K$	35
4.7	Sismogramas WL: (a) Original; (b) Deconvolvido WL com filtro de 1 coeficiente; (c) DWL com 2 coeficientes.	36
4.8	Espectro de amplitude médio: Original e DWL com $n = 1$ e $n = 2$ coeficientes.	37
4.9	Sismogramas DIL_p : (a) Original; (b) DIL_p e filtro com 1 coeficiente; (c) DIL_p com 2 coeficientes.	38
4.10	Espectro de amplitude médio: Original e DIL_p com $n = 1$ e $n = 2$ coeficientes.	38
4.11	<i>Supergathers</i> -CMP 3425: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}	40
4.12	Espectro de Velocidades-CMP 3425: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}	40
4.13	Espectros de Velocidades-CMP 27350: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}	41

4.14	Espectros de Velocidades-CMP 29525: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}	41
4.15	Campo de velocidades RMS obtido através da análise de velocidade do dado original.	42
4.16	Campo de velocidades RMS obtido através da análise de velocidade do dado filtrado com SVD_{df}	42
4.17	Fluxograma de Processamento.	44
4.18	Seção empilhada original.	45
4.19	Seção empilhada com filtragem SVD_{df}	46
4.20	Seção empilhada com filtragem DWL.	47
4.21	Seção empilhada com filtragem DIL_p	48
4.22	Seção empilhada com filtragem F-K+ SVD_{df}	49
4.23	Seção empilhada com filtragem F-K+ SVD_{df} + DIL_p	50
4.24	Detalhe 1 da seção sísmica: (a) Original; (b) Filtrada com SVD_{df} ; (c) Filtrada com F-K+ SVD_{df} ; (d) Filtrada com F-K+ SVD_{df} + DIL_p	51
4.25	Detalhe 2 da seção sísmica: (a) Original; (b) Filtrada com SVD_{df} ; (c) Filtrada com F-K+ SVD_{df} ; (d) Filtrada com F-K+ SVD_{df} + DIL_p	52

INTRODUÇÃO

O processamento de dados sísmicos, compõe uma das várias tarefas envolvidas na exploração de hidrocarbonetos. Envolve um volume grande de informações que devem ser devidamente tratadas com o objetivo de gerar uma seção sísmica de qualidade e com boa representação do interior da terra. Por meio de tal informação, constituirá para a tarefa/arte de interpretação geológica de subsuperfície o mapeamento das estruturas acumuladoras de hidrocarbonetos.

Se o meio geológico é infinito, homogêneo e isotrópico apenas ondas P e S existem, entretanto quando o mesmo é limitado, ondas superficiais podem ser geradas. Ondas superficiais estão confinadas na fronteira de uma das interfaces que demarca o meio. Na sísmica de exploração, as ondas *Rayleigh* são o tipo de ondas superficiais mais importantes, e que são também conhecidas como *ground roll*. Esse tipo de onda viaja ao longo da superfície da terra e envolve a combinação de movimento transversal e longitudinal. A amplitude desse movimento de onda decai exponencialmente com a profundidade. O movimento da partícula e da direção de propagação da onda estão confinados em um plano vertical, é elíptico e retrógrado (Telford et al., 1976). O *ground roll* é considerado um tipo de ruído para a sísmica de exploração e é muito presente em dados sísmicos terrestres. Tem formato cônico, ocupa a região central do sismograma, superpondo-se aos eventos de reflexões ali presentes, reduzindo a razão sinal/ruído do dado sísmico. É um evento linear, de inclinação maior do que as ondas diretas, e que possui baixa frequência, alta amplitude e baixa velocidade. Sua atenuação é importante para o processamento sísmico, pois contribuirá para uma seção sísmica empilhada de maior qualidade, que poderá caracterizar melhor o meio geológico em subsuperfície.

O método de decomposição em valores singulares (SVD) é uma importante ferramenta que é utilizada no processamento de dados sísmicos como filtro bidimensional de coerência. Responsável pelo aumento da razão sinal/ruído, através da separação do ruído em bandas distintas de autoimagens, e limitando-se corretamente quais autoimagens serão utilizadas na reconstrução do dado sísmico filtrado, obtém-se a informação sem o ruído. São inúmeros os trabalhos que fazem uso do método SVD na melhoria do processamento sísmico, combinado com a deconvolução, aplicado à atenuação do *ground roll* e melhoria da análise de velocidade (Freire, 1986; Bekara e Van der Baan, 2007; Porsani et al., 2009; Mojica, 2011). A filtragem adaptativa SVD, é realizada através da restituição do traço central coletado dentro de um subconjunto de traços, reconstituído com o primeiro autovalor que é o dominante e que compõe, por exemplo, as reflexões de interesse. Quando atua no domínio da frequência

(SVD_{df}) poderá ser aplicada a uma faixa de frequência do dado, que resultará no conteúdo característico para aquela banda escolhida e a filtragem é realizada através da diferença entre o espectro original e o espectro predito pelo SVD. Aplicada dessa forma, a filtragem SVD_{df} consegue atuar no intervalo de frequência do *ground roll* e atenuá-lo.

A deconvolução é uma importante etapa do processamento de dados sísmicos, que quando aplicada tem como característica aumentar a resolução temporal do dado, e permite que o pulso sísmico seja comprimido e as reflexões sejam bem delineadas. Esse é um fator que auxilia e facilita, sobretudo, o rastreamento dos refletores das camadas em subsuperfície. Recuperar a função de refletividade, traduz todo o porquê de ser empregada a deconvolução sísmica, pois na refletividade estão embutidas as características geológicas do meio. Para isso convolve-se o traço sísmico com o filtro inverso do pulso sísmico. Como geralmente a assinatura da fonte sísmica é desconhecida, diz-se que a deconvolução é um processo estatístico. Na forma convencional, utiliza-se a deconvolução de Wiener-Levinson (DWL), que possui como premissas o pulso ser de fase mínima e a refletividade ser aleatória, pois a partir disso é possível que o filtro seja causal e que também uma aproximação da função autocorrelação do pulso (desconhecido) seja obtida pela autocorrelação do traço sísmico. No entanto, principalmente o caráter de fase mínima do pulso é difícil de acontecer, em uma situação mais real o pulso é de fase mista, dessa forma não se obtém os melhores resultados da DWL (Porsani e Ursin, 2000). A deconvolução iterativa com norma L_p (DIL_p), como não depende da premissa de fase mínima do pulso sísmico, apresenta resultados um pouco melhores do que a DWL, pois utiliza filtro causal e anti-causal, e assim pode atuar com pulsos de fase mista (Melo, 2002).

Este trabalho tem como objetivo aplicar a filtragem SVD_{df} , deconvolução de Wiener-Levinson, deconvolução iterativa com norma L_p e associar o melhor resultado da filtragem SVD_{df} com o melhor resultado de deconvolução para fornecer maneiras alternativas para atenuar o *ground roll*, como também melhorar a análise de velocidade e aumentar a razão sinal/ruído na seção sísmica empilhada final.

A divisão do trabalho foi feita da seguinte forma: no Capítulo 1 são apresentados os fundamentos teóricos do método SVD e da filtragem adaptativa SVD_{df} ; no Capítulo 2 aborda-se a deconvolução de Wiener-Levinson e a deconvolução iterativa com norma L_p ; no Capítulo 3 a DWL e DIL_p são aplicadas em dados sintéticos; no Capítulo 4 a filtragem SVD_{df} , a DWL e DIL_p são aplicadas em dados reais; por fim no Capítulo 5 aborda-se as principais conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 1

Filtragem Adaptativa SVD

1.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos da filtragem adaptativa SVD. Essa é uma ferramenta muito útil para o processamento de dados sísmicos, pois permite a separação entre os eventos de reflexões e o ruído, tal fato é possível através da separação do sinal sísmico em somatórios de autoimagens, onde aquelas com os maiores valores singulares correspondem aos eventos correlacionáveis, tal como as reflexões, já as últimas autoimagens possuem menor magnitude e nas quais estão contidas os eventos não correlacionáveis, tal como o *ground roll*. Dessa forma, separando devidamente as bandas de autoimagens é possível através da reconstituição SVD daquelas maiores obter-se o dado sísmico atenuado do ruído, como resultado melhora-se significativamente qualidade do dado sísmico.

Considere a matriz dos dados sísmicos $\mathbf{X}$ de dimensão $m \times n$, com m representando o número de amostras e n o número de traços. Cada elemento $\mathbf{x}_{ij}$ dessa matriz consiste na amplitude captada pelo receptor j no instante i .

A matriz $\mathbf{X}$ pode ser decomposta em valores singulares, através dos autovalores e autovetores de matrizes de covariância, $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ e $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$, que lhe estão associadas. O produto dos autovetores dessas matrizes de covariância e dos valores singulares (raíz quadrada de cada autovalor) de $\mathbf{X}$ define as autoimagens.

Cada autoimagem possui uma parcela de informação da matriz dos dados sísmicos $\mathbf{X}$ e sua importância relativa pode ser medida por meio da magnitude do autovalor associado. As autoimagens associadas aos maiores autovalores possuem a maior parte da informação correlacionável. Dessa forma, a decomposição em valores singulares de $\mathbf{X}$ pode ser utilizada como um filtro bidimensional de coerência entre traços, conhecido como filtro SVD (*Singular Value Decomposition*) (Freire, 1986).

1.2 Matrizes de Covariância $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ e $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$

As matrizes de covariância são importantes no método SVD, pois a decomposição é realizada através delas e também por meio da matriz dos valores singulares, abordada na seção adiante.

A primeira matriz de covariância é $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$, Eq.(1.1), possui ordem m , seus elementos são calculados pelo produto interno dos traços sísmicos. Cada elemento $x_i x_j$ dessa matriz é a projeção do traço i sobre o traço j , onde os elementos da diagonal principal equivalem a autocorrelação do traço sísmico e aqueles fora dela são correlações cruzadas entre os traços. De tal maneira, o somatório dos elementos diagonais de $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ representa o conteúdo total de energia disponível em $\mathbf{X}$ e a magnitude de cada elemento fora da diagonal indica o grau de correlação ou de coerência horizontal entre os traços (Freire, 1986).

$$\mathbf{X}\mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} \sum_j x_{1,j}^2 & \sum_j x_{1,j}x_{2,j} & \cdots & \sum_j x_{i,1}x_{m,j} \\ \sum_j x_{2,j}x_{1,j} & \sum_j x_{2,j}^2 & \cdots & \sum_j x_{i,2}x_{m,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_j x_{m,j}x_{1,j} & \sum_j x_{m,j}x_{2,j} & \cdots & \sum_j x_{m,j}^2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

A segunda matriz de covariância é a matriz $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$, Eq. (1.2), e possui ordem n . Cada vetor dessa matriz contém amostras de $\mathbf{X}$ em um determinado instante de tempo j . Como consequência, cada elemento de $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ indica o tempo t e com que intensidade a correlação existe. As informações registradas em cada instante de tempo estão presentes na diagonal principal de $\mathbf{X}$ e os elementos fora da diagonal fornecem o grau de correlação entre dois instantes distintos (Freire, 1986).

$$\mathbf{X}^T\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \sum_i x_{i,1}^2 & \sum_i x_{i,1}x_{i,2} & \cdots & \sum_i x_{i,1}x_{i,n} \\ \sum_i x_{i,2}x_{i,1} & \sum_i x_{i,2}^2 & \cdots & \sum_i x_{i,2}x_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_i x_{i,n}x_{i,1} & \sum_i x_{i,n}x_{i,2} & \cdots & \sum_i x_{i,n}^2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

1.3 Autovalores e Autovetores

Considere, por exemplo, a matriz de covariância $\mathbf{V} = \mathbf{X}^T\mathbf{X}$ e a matriz identidade $\mathbf{I}$. Um vetor $\mathbf{z}$ não nulo e um escalar λ , que se obedecerem a Eq. (1.4) são chamados autovetor e autovalor de $\mathbf{V}$, respectivamente:

$$\mathbf{V}\mathbf{z} = \lambda\mathbf{z} \quad (1.3)$$

$$(\mathbf{V} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{z} = \mathbf{0}. \quad (1.4)$$

Na Eq. (1.4), para que a solução não seja trivial, deve-se ter:

$$P(\lambda) = \det(\mathbf{V} - \lambda\mathbf{I}) = \det \begin{pmatrix} v_{11} - \lambda & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} - \lambda & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} - \lambda \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

$$P(\lambda) = \det(\mathbf{V} - \lambda\mathbf{I}) = 0. \quad (1.6)$$

A Eq. (1.5) é conhecida como polinômio característico e a Eq. (1.6) é chamada de equação característica de $\mathbf{V}$. As raízes do polinômio característico são os autovalores de $\mathbf{V}$. De posse desses autovalores λ_j , ($j = 1, 2, \dots, n$), calcula-se cada autovetor associado ao autovalor (Freire, 1986).

1.4 Decomposição em Valores Singulares

A matriz $\mathbf{X}$ ($m \times n$), com posto $p \leq \min(m, n)$, pode ser fatorada através das matrizes de covariância $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ ($m \times m$) e $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ ($n \times n$) e de uma matriz diagonal $\mathbf{\Sigma}$, tal como descrito pelas relações e equações abaixo:

$$\mathbf{U} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T \quad (1.7)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{X}^T\mathbf{X} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{\Sigma} = \mathbf{U}^T\mathbf{X}\mathbf{V} \quad (1.9)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1.10)$$

A matriz $\mathbf{\Sigma}$ tem dimensão $m \times n$ e é dada por:

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Os elementos da diagonal são os valores singulares σ_i , $i = 1, \dots, n$ da matriz $\mathbf{X}$. São valores não negativos, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ e cada valor singular é obtido do autovalor correspondente, de modo que $\lambda_i = \sigma_i^2$.

Outra representação para $\mathbf{X}$ é através do somatório de matrizes de posto unitário,

ponderadas pelos valores singulares, da seguinte forma:

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^p \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (1.12)$$

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

A decomposição da matriz $\mathbf{X}$ pelo somatório de suas autoimagens ponderadas pelos respectivos valores singulares, atua como um filtro bidimensional de coerência. O fato que justifica utilizar o método SVD como um filtro para os dados sísmicos é que o ruído e o sinal ocupam bandas diferentes de autoimagens, dessa forma selecionando as autoimagens devidamente pode-se atenuar ruídos, mas preservando as reflexões (Freire, 1986).

1.5 Filtragem SVD

A aplicação do método SVD como um tipo de filtragem de ruídos presentes em uma seção sísmica é realizada através da seleção na matriz dos dados $\mathbf{X}$ de um subconjunto de traços sísmicos, esse subconjunto define uma submatriz. Calcula-se então os valores singulares dessa submatriz, cuja soma ponderada, por cada autovetor associado, deverá resguardar as informações mais representativas do dado sísmico como um todo. Isso quer dizer que embora não se esteja como o conjunto total de informações que formam $\mathbf{X}$, tem-se aqueles elementos mais importantes para sua satisfatória representação. Assim, esse subconjunto quando for reconstituído através do somatório das primeiras autoimagens, serão responsáveis por formar a seção sísmica atenuada do ruído.

Seja, então, o subconjunto de M traços sísmicos, $x(t, a_n)$, $t = 1, \dots, N_t$ e $n = 1, \dots, M$. E a matriz dos dados sísmicos $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_M] = \{x(t, a_1), \dots, x(t, a_M)\}$, pode ser representada pelo método SVD através da forma reduzida (Golub e Van Loan, 1996):

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T, \quad (1.13)$$

onde:

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

A Eq. (1.13) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_1 & \cdots & \sigma_M \mathbf{u}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_M^T \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \cdots & \mathbf{x}_j & \cdots & \mathbf{x}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_1 & \cdots & \sigma_M \mathbf{u}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1,1} & \cdots & v_{1,j} & \cdots & v_{1,M} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ v_{M,1} & \cdots & v_{M,j} & \cdots & v_{M,M} \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

Na Eq. (1.15), se tomarmos um traço sísmico $\mathbf{x}_j$ e representá-lo como somatório de autoimagens teremos, a seguinte equação:

$$\mathbf{x}_j = \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_1 & \cdots & \sigma_M \mathbf{u}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1,j} \\ \vdots \\ v_{M,j} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

$$= \tilde{\mathbf{x}}_{j1} + \cdots + \tilde{\mathbf{x}}_{jk} + \cdots + \tilde{\mathbf{x}}_{jM} = \sum_{k=1}^M \sigma_k \mathbf{u}_k v_{k,j}. \quad (1.17)$$

A Eq. (1.17) nos diz que o traço sísmico $\mathbf{x}_j$ pode ser obtido como uma combinação linear da soma ponderada de autovetores associados à dimensão do tempo pelos autovetores associados à dimensão espacial e os respectivos valores singulares, em resumo, trata-se da decomposição SVD do traço.

Dessa forma, a matriz dos dados sísmicos $\mathbf{X}$ pode também ser reescrita em função de σ_k , $\mathbf{u}_k$ e $\mathbf{v}_k^T$, como abaixo:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \cdots & \mathbf{u}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \sigma_M \mathbf{v}_M^T \end{bmatrix} \\ &= \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T + \cdots + \sigma_M \mathbf{u}_M \mathbf{v}_M^T \\ &= \tilde{\mathbf{X}}_1 + \tilde{\mathbf{X}}_k + \cdots + \tilde{\mathbf{X}}_M \\ &= \sum_{k=1}^M \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T. \end{aligned} \quad (1.18)$$

A Eq. (1.18) representa a decomposição SVD de toda a matriz $\mathbf{X}$.

A matriz $\tilde{\mathbf{X}}_k = \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$ é uma matriz de posto unitário, chamada de autoimagem k da matriz $\mathbf{X}$, ao passo que $\tilde{\mathbf{x}}_{jk}$ é o traço j da matriz $\tilde{\mathbf{X}}_k$. Sendo assim, ao tomarmos somente k autoimagens podemos obter uma reconstituição parcial de $\mathbf{X}$.

Os primeiros autovalores são os que possuem uma maior magnitude e as primeiras autoimagens guardam as informações que representam as feições de maior correlação espacial, tal como as reflexões (Freire, 1986).

O procedimento de filtragem SVD atua tomando para cada traço de uma seção sísmica, o subconjunto de M traços imediatamente vizinhos, realiza a decomposição SVD da matriz formada por esse subconjunto de dados e restitui apenas parcialmente o traço resultante $\tilde{\mathbf{x}}_j$, como mostra a equação abaixo:

$$\tilde{x}(t, a_j) = \sum_{k=1}^K \sigma_k u_k(t) v_k(a_j). \quad (1.19)$$

O traço filtrado $\tilde{x}(t, a_j)$, é formado através dos K autovetores. Se utilizarmos valores pequenos de K , as seções e os traços resultantes possuirão maior coerência espacial, preservando eventos horizontais e sub-horizontais, e atenuando os eventos mais verticais, tal como o *ground roll* (Porsani et al., 2009; Mojica, 2011).

1.6 Filtragem Adaptativa SVD no Domínio da Frequência

A filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência (SVD_{df}) é aplicada a uma faixa de frequência do espectro do dado, resultando em um conteúdo de frequência coerente com os demais para aquele intervalo escolhido.

Inicialmente leva-se o dado para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT). Nesse novo domínio, aplica-se a filtragem adaptativa SVD resultando no espectro predito com o primeiro autovetor (espectro SVD). O espectro filtrado será a diferença entre o espectro original e o espectro SVD, finalmente realiza-se a transformada de Fourier inversa (FFTI) retornando com o dado para o domínio do tempo.

A filtragem adaptativa SVD_{df} tem como parâmetros a serem definidos o tamanho da janela com L traços, o número de vezes que será realizada a diferença entre espectro original e espectro predito com primeiro autovetor, denominado de número de refinamento (N_{ref}) e a banda de frequência na qual o método deve atuar. Esses parâmetros são escolhidos tal que quando combinados resultem na melhor filtragem. A banda de frequência poderá se restringir a um intervalo específico.

O espectro SVD resultante possuirá conteúdo e frequência mais representativo daquela banda escolhida e se tomarmos a diferença com o espectro original, o espectro resultante estará com dado atenuado das frequências do intervalo escolhido. Resultando como dado filtrado aquele cujo conteúdo de frequência tenha atenuado o espectro SVD. Dessa forma é possível atenuar o conteúdo de frequência do intervalo no qual se realizou a filtragem adaptativa SVD.

A cada refinamento, o dado de entrada será o espectro resultante da filtragem anterior, repetindo-se o procedimento o número de refinamentos que melhor filtre o dado. Pode-se também partir de uma frequência inicial e percorrer todo o intervalo de frequência do dado, dessa forma o resultado da filtragem SVD_{df} não sofrerá um salto no intervalo de frequência do espectro de amplitude.

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. Por isso, essa filtragem SVD_{df} é melhor quando comparada com a utilizada em (Lima, 2013), uma vez que o comportamento do espectro do dado filtrado é mais suave.

1.6.1 Etapas do Algoritmo SVD_{df}

DO $j = 1, nt$ ($nt =$ número de traços)

- Leitura do traço de entrada $\rightarrow x_i$
- Calcula o traço complexo com parte imaginária nula $\rightarrow cx_i$
- Aplica a FFT ao $cx_i \rightarrow x_{fi}$ (traço no domínio da frequência)
- Seleciona a parte real de x_{fi}

ENDDO

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

DO $i = 1, Nref$

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

- Monta a matriz Y_f

ENDDO

- Decomposição SVD da matriz $Y_f \rightarrow Z_f$

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

ENDDO

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

CAPÍTULO 2

Deconvolução de Dados Sísmicos

2.1 Introdução

A deconvolução tem como objetivo aprimorar a resolução temporal do dado sísmico. Comprime o pulso e torna as reflexões mais delineadas.

O traço sísmico contém as informações registradas das camadas em subsuperfície, tais como a densidade da rocha e velocidade sísmica, cujo produto resulta na impedância acústica. O contraste de impedância entre camadas adjacentes é o que rege a reflexão da onda sísmica.

O sismograma é o resultado da convolução entre a resposta impulsiva da Terra e o pulso sísmico. E quando a deconvolução é aplicada, na forma ideal, recupera a função refletividade.

2.1.1 O modelo convolucional do traço sísmico

A formulação matemática para o modelo convolucional do traço sísmico é dada pela seguinte equação:

$$x_t = p_t * e_t + \eta_t. \quad (2.1)$$

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.

Para a construção do traço sísmico de tal maneira, algumas suposições são feitas:

- A terra é composta por camadas planas e horizontais com velocidade constante;

- A fonte impulsiva gera somente ondas P com ângulo de incidência normal, logo ondas S não ocorrem;
- A frente de onda é estacionária, despreza-se as perdas por absorção e o decaimento de amplitude;
- O ruído η_t é desprezível;
- A assinatura da fonte é conhecida.

Se a assinatura da fonte é conhecida, a deconvolução é dita ser determinística. Quando é desconhecida, caso usual, diz-se que o problema de deconvolução é resolvido de forma estatística.

A Eq. (2.1), para um filtro de $N + 1$ coeficientes, pode ser reescrita como um somatório:

$$x_t = \sum_{k=0}^N p_k e_{t-k} + \eta_t. \quad (2.2)$$

A deconvolução de uma sequência qualquer, nada mais é do que a convolução da mesma com seu filtro inverso.

Então, para recuperar a função refletividade do meio, basta deconvolver o pulso p_t , através da convolução do traço sísmico com o filtro inverso desse pulso p_t . Tal filtro inverso é chamado operador de erro de predição de Wiener (Yilmaz, 2001).

Se assumirmos que $\tilde{h}_t$ é uma aproximação do filtro inverso do pulso p_t , teremos:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_t &\approx p_t^{-1} \\ \tilde{h}_t * p_t &= \delta_t, \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde δ_t representa a delta de Kronecker.

Convolvendo o filtro inverso $\tilde{h}_t$ com a Eq. (2.1)

$$\begin{aligned} \tilde{h}_t * x_t &= \tilde{h}_t * p_t * e_t + \tilde{h}_t * \eta_t \\ &= \delta_t * e_t + \tilde{h}_t * \eta_t \\ &= e_t + \tilde{h}_t * \eta_t. \end{aligned}$$

E considerando o ruído η_t desprezível, observa-se que a convolução do traço com o filtro inverso restitui a refletividade.

A deconvolução do pulso sísmico é convolução do pulso com seu filtro inverso, de tal forma, que é possível recuperar a resposta impulsiva da subsuperfície.

2.1.2 Filtro inverso de um pulso conhecido

Conhecendo-se a assinatura da fonte sísmica, seu filtro inverso, $\tilde{h}_t = \{\tilde{h}_0, \dots, \tilde{h}_N\}$ pode ser obtido, pois quando for convolvido com $p_t = \{p_0, \dots, p_M\}$, resultará na aproximação do impulso,

$$\tilde{h}_t * p_t = \tilde{\delta}_t \approx \delta_t. \quad (2.4)$$

Sendo o desvio entre o sinal desejado, δ_t , e o calculado, $\tilde{\delta}_t$, representado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} e_t &= \delta_t - \tilde{\delta}_t \\ &= \delta_t - \tilde{h}_t * p_t. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Através da notação matricial, e usando como exemplo um filtro de três coeficientes, podemos reescrever a Eq. (2.5),

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & p_0 & 0 & 0 \\ 0 & p_1 & p_0 & 0 \\ 0 & p_2 & p_1 & p_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & p_M & p_{M-1} & p_{M-2} \\ 0 & 0 & p_M & p_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & p_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\tilde{h}_1 \\ -\tilde{h}_2 \\ -\tilde{h}_3 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

A forma quadrática associada, correspondente aos erros quadrados, $Q(\tilde{h}) = \sum_t e_t^2$, é um número positivo que possui pelo menos um ponto de mínimo. O conjunto de coeficientes $\{\tilde{h}^*\}$, tal que faz $Q(\tilde{h}^*)$ mínimo, representará o filtro inverso ótimo obtido por meio do método dos mínimos quadrados. Minimizando $Q(\tilde{h})$, resulta no sistema de equações conhecido como equações normais, ENs, representado como segue, para o filtro inverso de $N + 1$ coeficientes:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_N \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_1 \\ r_N & \dots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{h}_0 \\ \tilde{h}_1 \\ \vdots \\ \tilde{h}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

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

$$r_k = \sum_t p_t p_{t+k}. \quad (2.8)$$

A matriz da Eq. (2.7) é simétrica em relação a diagonal principal, e é denominada matriz de autocorrelação, banda estrutura Toeplitz. A solução do sistema pode ser obtida pela recursão de Levinson (Levinson, 1947; Porsani, 1986).

2.1.3 A deconvolução de Wiener-Levinson

A deconvolução sísmica clássica é conhecida como deconvolução de Wiener-Levinson, na qual está embutida duas premissas: o pulso é de fase mínima e a refletividade é branca. O pulso sísmico é dito ser de fase mínima, quando seu polinômio $P(Z)$ tem suas raízes no plano complexo Z , situadas fora do círculo de raio unitário.

O método possui as seguintes etapas:

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

O filtro de WL é causal ($t = 0, \dots, N$), dessa forma é o inverso de um pulso de fase mínima, pois somente pulsos de fase mínima possuem filtros inversos causais. Logo, a deconvolução de WL é aplicada sob a premissa de que o pulso sísmico é de fase mínima. Outro obstáculo no método de WL é a função de autocorrelação (FAC) utilizada, pois uma vez que não se dispõe do pulso sísmico, a FAC do pulso é estimada diretamente a partir do traço sísmico. 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 ser aleatória, ou branca (Robinson e Treitel, 1980; Yilmaz, 2001; Ledesma, 2011).

2.1.4 Filtro inverso de Wiener-Levinson

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

$$\tilde{x}_t = \tilde{a}_1 x_{t-1} + \dots + \tilde{a}_N x_{t-N}, \quad (2.9)$$

onde o erro de predição ou resíduo é $e_t = x_t - \tilde{x}_t$, e dado por:

$$e_t = x_t - \tilde{a}_1 x_{t-1} - \tilde{a}_2 x_{t-2} - \dots - \tilde{a}_N x_{t-N}. \quad (2.10)$$

A Eq. (2.10) também pode ser escrita na forma matricial da seguinte forma,

$$e_t = \begin{bmatrix} x_t & x_{t-1} & \dots & x_{t-N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

com $a_j = -\tilde{a}_j$.

Exemplificando o sistema de equações associados a forma matricial da Eq. (2.11) para filtro com $N = 3$ coeficientes, tem-se:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \\ e_{M+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & 0 \\ x_3 & x_2 & x_1 & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & x_{M-1} & x_{M-2} & x_{M-3} \\ 0 & x_M & x_{M-1} & p_{M-2} \\ 0 & 0 & x_M & x_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

A soma dos resíduos quadrados, $\sum_i e_i^2 = Q(a)$, que quando minimizada em relação aos parâmetros a_j ($j = 1, 2, 3$), resulta no sistema de equações normais, é representado pela seguinte forma matricial ampliada:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \\ r_1 & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_2 & r_1 & r_0 & r_1 \\ r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

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

$$r_k = \sum_t x_t x_{t+k}.$$

A matriz das equações normais é dita ser matriz de autocorrelação banda-estruturada Toeplitz. O sistema de equações (2.13) pode ser resolvido através da recursão de Levinson. Apresenta-se logo abaixo, os passos do algoritmo da recursão de Levinson:

INÍCIO:

$$E_{a_0} = r_0$$

DO $j=1, N$

$$\Delta_{a_{j-1}} = \begin{pmatrix} r_j & \dots & r_1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_{j-1,1} \\ \vdots \\ a_{j-1,j-1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} E_{a_{j-1}} & \Delta_{a_{j-1}} \\ \Delta_{a_{j-1}} & E_{a_{j-1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{a_j} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ a_{j1} \\ \vdots \\ a_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a_{jj} \\ \vdots \\ a_{j-1,j-1} \\ 0 \end{pmatrix} + a_{jj} \begin{pmatrix} 0 \\ a_{j-1,j-1} \\ \vdots \\ a_{j-1,1} \\ 1 \end{pmatrix}$$

ENDDO

A sequência $(1 \ a_{j1} \dots a_{jj})$ obtida no último passo do sistema acima corresponde ao filtro causal. Então, se revertermos a ordem dos coeficientes obteremos a nova sequência $(a_{jj} \dots a_{j1} \ 1)$ que representa o filtro anti-causal.

2.2 Deconvolução Iterativa do Pulso Utilizando Norma L_p

Na seção anterior vimos que a deconvolução de Wiener-Levinson é conduzida através da suposição do caráter de fase mínima do pulso sísmico e cujo filtro é causal. Entretanto, em uma situação mais real, vê-se que tal premissa é muito difícil de acontecer. Para que a deconvolução seja realizada da melhor maneira é necessária a desvinculação desse requisito.

A deconvolução iterativa com norma L_p (DIL_p) é um método de deconvolução que não depende do caráter da fase do pulso sísmico e obtém bons resultados mesmo quando o pulso sísmico é de fase mista, pois a mesma é realizada com filtro causal e anti-causal. O mesmo já não se pode dizer da deconvolução de Wiener-Levinson (WL) (Porsani e Ursin, 2000; Porsani, Niwas e Ferreira, 2001; Melo, 2002).

2.2.1 Fundamentos Teóricos

A partir do erro de predição do sinal, pode-se definir a função objetivo que é elevada, nessa situação, a uma norma L_p da seguinte forma:

$$Q(\mathbf{a}^+, p) = \sum_{t=0}^{M+N} \left\{ [e_t^2]^{1/2} \right\}^p, \quad (2.14)$$

onde:

- $\mathbf{a}^+$ é o vetor com os coeficientes do filtro causal;
- p corresponde ao expoente da norma L_p ;
- M representa o número de amostras do traços x_t ;
- N representa o número de coeficientes do filtro;
- e_t corresponde às amostras no tempo t do traço deconvolvido, dado pela Eq. (2.11).

2.2.2 Linearização da Função Objetivo

Através da Eq. (2.14) uma função não linear pode ser definida da seguinte forma:

$$f(\mathbf{a}, p, t) = (e_t^2)^{p/4}. \quad (2.15)$$

A Eq. (2.15) pode ser expandida por série de Taylor em torno do modelo atual $\mathbf{a}_k$, e desprezando-se os termos de segunda ordem, resulta:

$$f(\mathbf{a}, p, t) \cong \tilde{f}(\mathbf{a}, p, t) = f(\mathbf{a}_k, p, t) + \left[\frac{p}{2} (e_t^2)^{p/4-1} e_t \right] \frac{\partial e_t}{\partial \mathbf{a}} \bigg|_{\mathbf{a}_k} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_k), \quad (2.16)$$

onde $f(\mathbf{a}, p, t)$ passa a ser uma função linear. Utilizando notação matricial, a Eq. (2.16) pode ser reescrita como segue:

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_1 \\ \vdots \\ \tilde{f}_{M+N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{M+N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{ii} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & F_{M+N, M+N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & 0 & \cdots & 0 \\ & x_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_M & \vdots & \ddots & x_0 \\ 0 & x_M & \ddots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 - a_{k,1} \\ \vdots \\ a_N - a_{k,N} \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

onde:

$$F_{ii} = \frac{p}{2}(e_i^2)^{p/4-1}e_i, \quad (2.18)$$

$$f_i = (e_i^2)^{p/4}. \quad (2.19)$$

2.2.3 Solução da Função Linear e Obtenção do Filtro

A Eq. (2.17) pode ser representada de maneira simplificada,

$$\tilde{\mathbf{f}}_p = \mathbf{f}_{kp} - \mathbf{F}_{kp}\mathbf{X}\Delta\mathbf{a}. \quad (2.20)$$

A solução da Eq. (2.20) será obtida quando for determinado o $\Delta\mathbf{a}$ que a satisfaça. Para isso, define-se uma forma quadrática que fornecerá o vetor $\Delta\mathbf{a}$, quando minimizada:

$$\tilde{Q}(\mathbf{a}, p) = \tilde{\mathbf{f}}_p^T \tilde{\mathbf{f}}_p. \quad (2.21)$$

Quando a Eq. (2.21) for derivada em relação aos parâmetros a_j ($j = 1, \dots, N$), obtém-se o sistema de equações normais:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X}) \Delta\mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp} \mathbf{f}_{kp}. \quad (2.22)$$

Multiplicando a Eq. (2.22) por $(\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X})^{-1}$ em ambos lados, resolve-se para o vetor $\Delta\mathbf{a}$, e obtém-se:

$$\Delta\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp}^2 \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{kp} \mathbf{f}_{kp}. \quad (2.23)$$

Os coeficientes do filtro podem ser atualizados por,

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \Delta\mathbf{a}. \quad (2.24)$$

Para obtermos o vetor $\Delta\mathbf{a}$ através da Eq. (2.23) utiliza-se o método do conjugado gradiente. Observe que para $p = 2$, obtém-se o sistema de equações normais associado a norma L_2 correspondente ao filtro de Wiener-Levinson.

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \Delta\mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{e}_k. \quad (2.25)$$

As equações descritas, correspondem àquelas que representam o traço deconvolvido utilizando o filtro causal $(1 \quad \mathbf{a}_k^T)$. E de maneira análoga, pode-se obter um conjunto similar

de equações para o filtro anti-causal, $(\mathbf{a}_k^T \ 1)$. O método DIL_p utiliza o filtro causal e anti-causal, tal como descrito na Eq. (2.26).

$$\begin{pmatrix} e_t^+ & e_t^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_t & x_{t-1} & \cdots & x_{t-N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a_N \\ a_1 & \vdots \\ \vdots & a_1 \\ a_N & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

2.2.4 Etapas do Algoritmo DIL_p

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

DO $k = 1, N_{iter}$

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

ENDDO

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

DO $k = 1, N_{iter}$

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

ENDDO

- Traço deconvolvido $x_t = e_t^-$

CAPÍTULO 3

Aplicação dos Métodos DWL e DIL_p em Dados Sintéticos

Nesta seção veremos como se comporta a deconvolução de Wiener-Levinson (DWL) e também a deconvolução iterativa com norma L_p (DIL_p), quando mudamos o caráter de fase mínima do pulso sísmico, premissa assumida na DWL, ou quando é de fase mista, situação mais real. Os dados sintéticos utilizados são pulso e traço sísmico, a finalidade é conhecer melhor o comportamento da DWL e da DIL_p quando mudamos fase do pulso, bem como a norma, e entender quais as principais diferenças entre essas deconvoluções. Os procedimentos seguidos para geração desses dados sintéticos são descritos a seguir.

Obter o pulso de fase mínima

- Extração de um traço do dado sísmico, que possuirá número de amostras ns ;
- Calcula-se a função de autocorrelação do traço com tamanho lw , que funcionará como uma estimativa da função de autocorrelação do pulso sísmico;
- Obtém o filtro de WL, com número de coeficientes ncf , associado a função de autocorrelação estimada;
- Obtém o filtro inverso (com mesmo número de coeficientes do filtro WL), ou seja, o filtro que convolvido com o pulso resultará na delta de Kronecker. Esse será o pulso de fase mínima.

Obter o pulso de fase máxima

- Reverte o pulso de fase mínima, gerando o pulso de fase máxima.

Obter o pulso de fase mista

- Convolve o pulso de fase mínima com o pulso de fase máxima, que podem ter ou não o mesmo tamanho, obtendo por fim o pulso de fase mista.

Obter o traço sísmico sintético

- Obtém uma função refletividade qualquer, que seja aleatória e com número variado de eventos;
- Convolve-se a refletividade com o pulso sísmico, gerando o traço sísmico sintético.

3.1 Deconvolução de um pulso fase mínima

Tem-se o pulso sísmico de fase mínima (Fig. 3.1), deconvolvido para o caso da DWL e bem como para a DIL_p . O pulso sísmico foi gerado tamanho $lw = 65$ e o número de coeficientes $ncf = 50$. Na situação da DIL_p utilizou-se $p = 1$. E tanto na DWL e DIL_p deconvolveu-se o pulso com $n = 50$ coeficientes. Observe que em ambas situações (Figs. 3.1 (b) e (c)), obtêm-se bons resultados, recuperando o impulso.

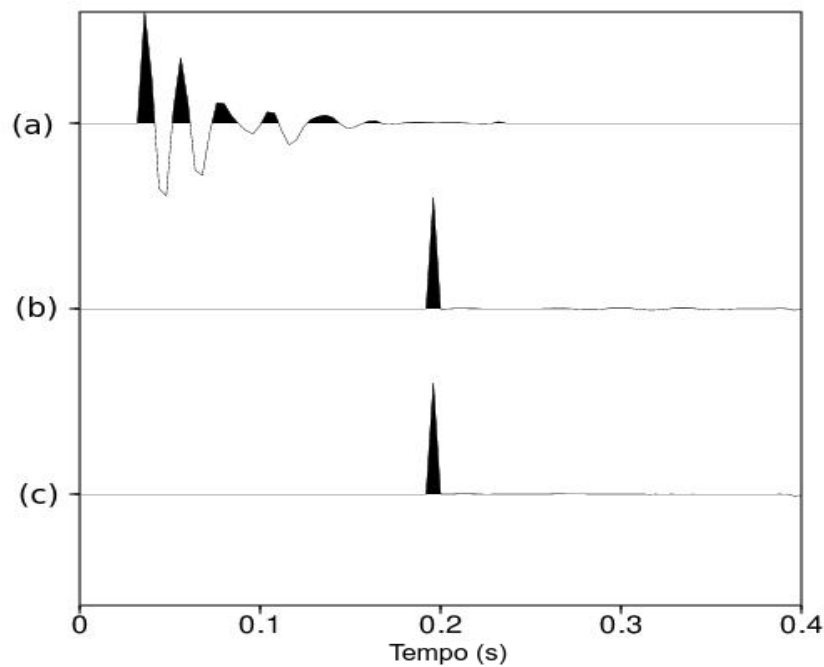


Figura 3.1: Deconvolução de um pulso fase mínima: (a) Pulso de fase mínima; (b) Deconvolvido WL e (c) Deconvolvido L_p com $p = 1$.

3.2 Deconvolução de um pulso fase mista

Representa-se a situação de um pulso de fase mista (Fig. 3.2), deconvolvido DWL e com DIL_p . Esse pulso foi gerado com tamanho $lw = 65$ e número de coeficientes $ncf = 50$. Na deconvolução DWL e DIL_p utilizou-se filtro com $n = 100$ coeficientes.

É possível ver que quando deconvolvemos um pulso de fase mista o resultado a DWL está longe de ser o ideal, mas no caso da DIL_p obtém-se um resultado bem superior ao anterior. Isso nos mostra a vantagem do método DIL_p diante do DWL, pois na deconvolução DIL_p pode-se atuar com pulsos de fase mista, bem como mínima, e alterar tanto o número de coeficientes do filtro quanto o valor da norma L_p de modo a obter um melhor resultado.

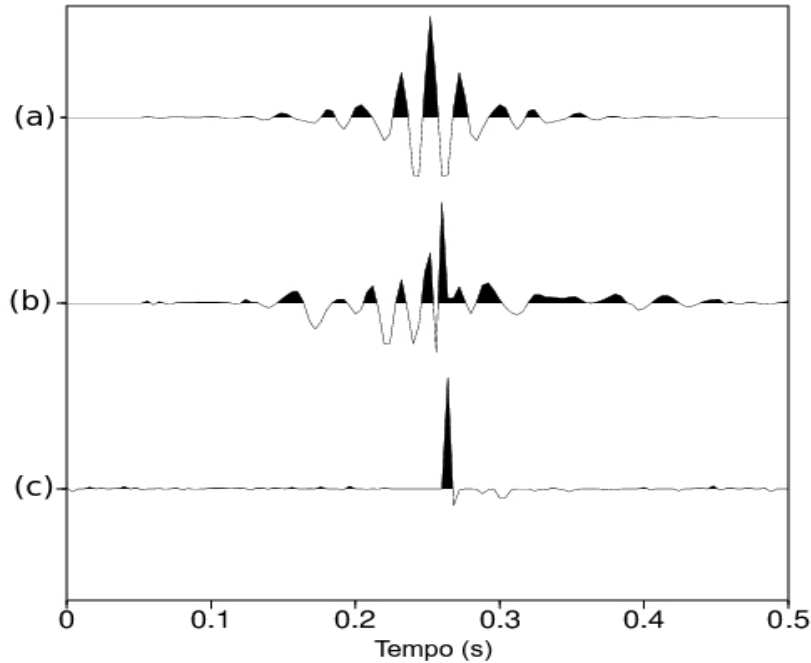


Figura 3.2: Deconvolução de um pulso fase mista: (a) Pulso de fase mista; (b) Deconvolvido WL e (c) Deconvolvido L_p com $p = 1$.

3.3 Deconvolução de um traço sísmico sintético

Foram gerados três tipos de traços sísmicos:

- (i) traço sísmico sintético obtido através do pulso de fase mínima (Fig. 3.3),
- (ii) traço sísmico obtido através do pulso de fase máxima (Fig. 3.4),

(iii) traço sísmico obtido através do pulso de fase mista (Fig. 3.5).

O maior objetivo da deconvolução é obter a função refletividade, aquela que guarda as informações físicas e geológicas da subsuperfície, sendo assim, quanto mais o resultado da deconvolução se parecer com a refletividade melhor ele será.

Observe que na Fig. 3.3 de (a)-(e) temos a refletividade, o pulso de fase mínima, o traço sísmico, o traço deconvolvido com a DWL e com DIL_p . Os resultados das duas deconvoluções são satisfatórios, pois recuperam com fidelidade a função refletividade.

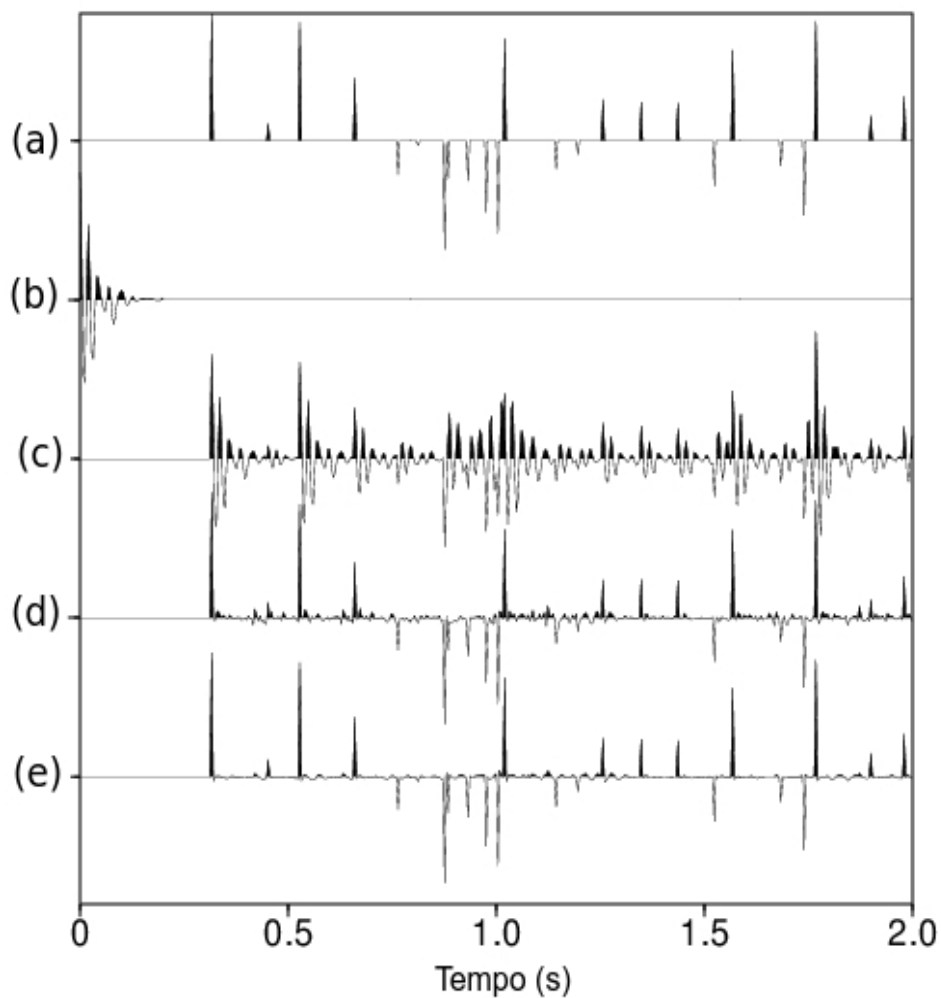


Figura 3.3: Deconvolução de um traço sintético: (a) Refletividade; (b) Pulso de fase mínima; (c) Traço sísmico; (d) Deconvolvido WL e (e) Deconvolvido L_p com $p = 1$.

Mostra-se o traço sísmico sintético obtido pela convolução da função refletividade com um pulso de fase máxima (Fig. 3.4). Perceba como a DWL não consegue recuperar devidamente a função refletividade (Fig. 3.4(d)), no entanto a DIL_p , diferente desse resultado, atua de modo satisfatório (Fig. 3.4(e)), pois seu resultado está bem próximo da refletividade.

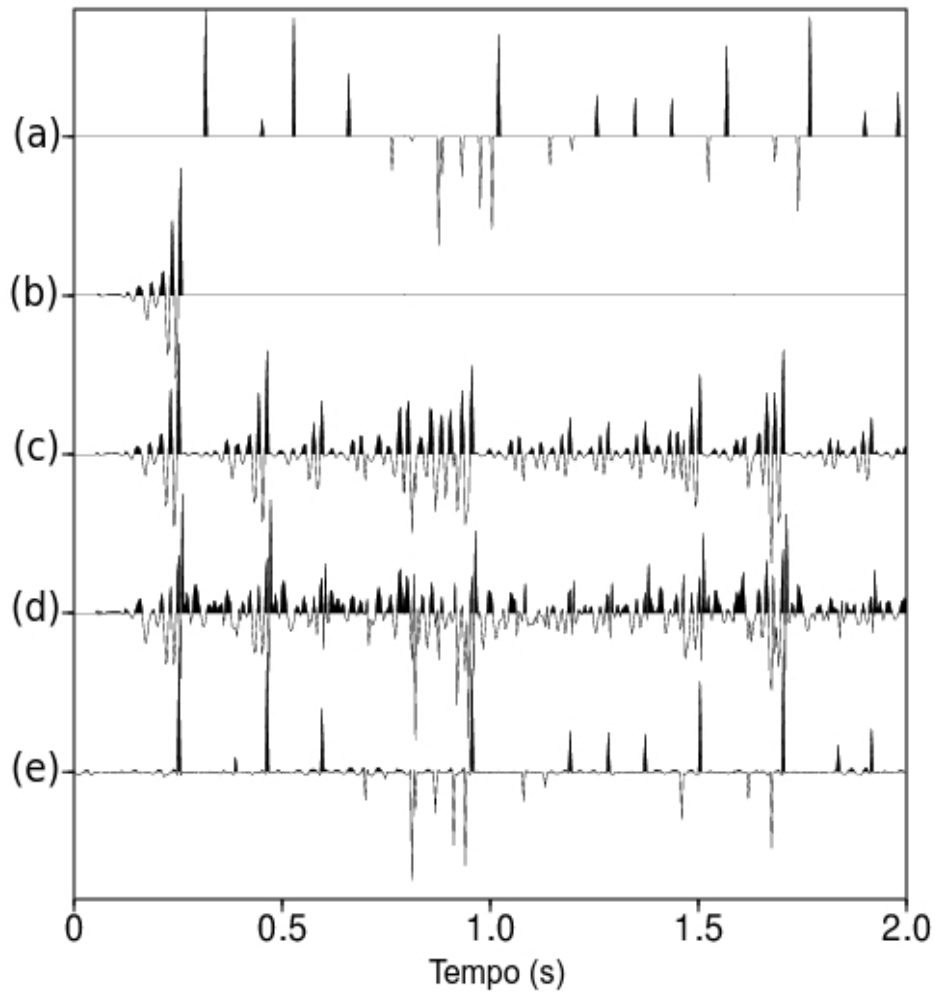


Figura 3.4: Deconvolução de um traço sintético: (a) Refletividade; (b) Pulso de fase máxima; (c) Traço sísmico; (d) Deconvolvido WL e (e) Deconvolvido L_p com $p = 1$.

Mostra-se o traço sísmico sintético obtido através do pulso de fase mista (Fig. 3.5). Através dos resultados, pode-se constatar a dificuldade que possui a DWL em atuar na presença de um pulso sísmico de fase mista (Fig. 3.5(d)). No entanto, a DIL_p consegue executar tal tarefa adequadamente, muito embora seu resultado não seja perfeito, mas superior ao DWL, recuperando a refletividade (Fig. 3.5(e)).

Nesse caso a influência da norma L_p fica mais clara, pois como se pode notar (Fig. 3.6), quanto mais próximo da norma L_2 mais o resultado da DIL_p se parecerá com a DWL.

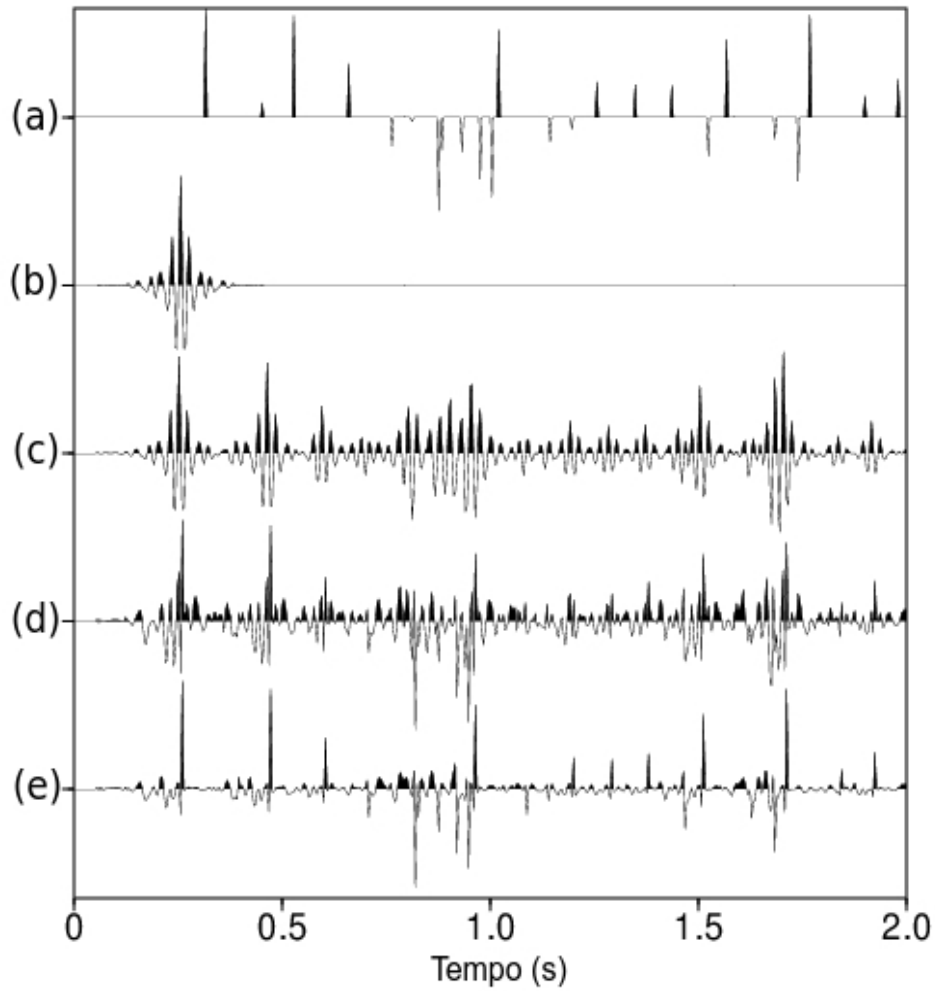


Figura 3.5: Deconvolução de um traço sintético: (a) Refletividade; (b) Pulso de fase mista; (c) Traço sísmico; (d) Deconvolvido WL e (e) Deconvolvido L_p com $p = 1$.

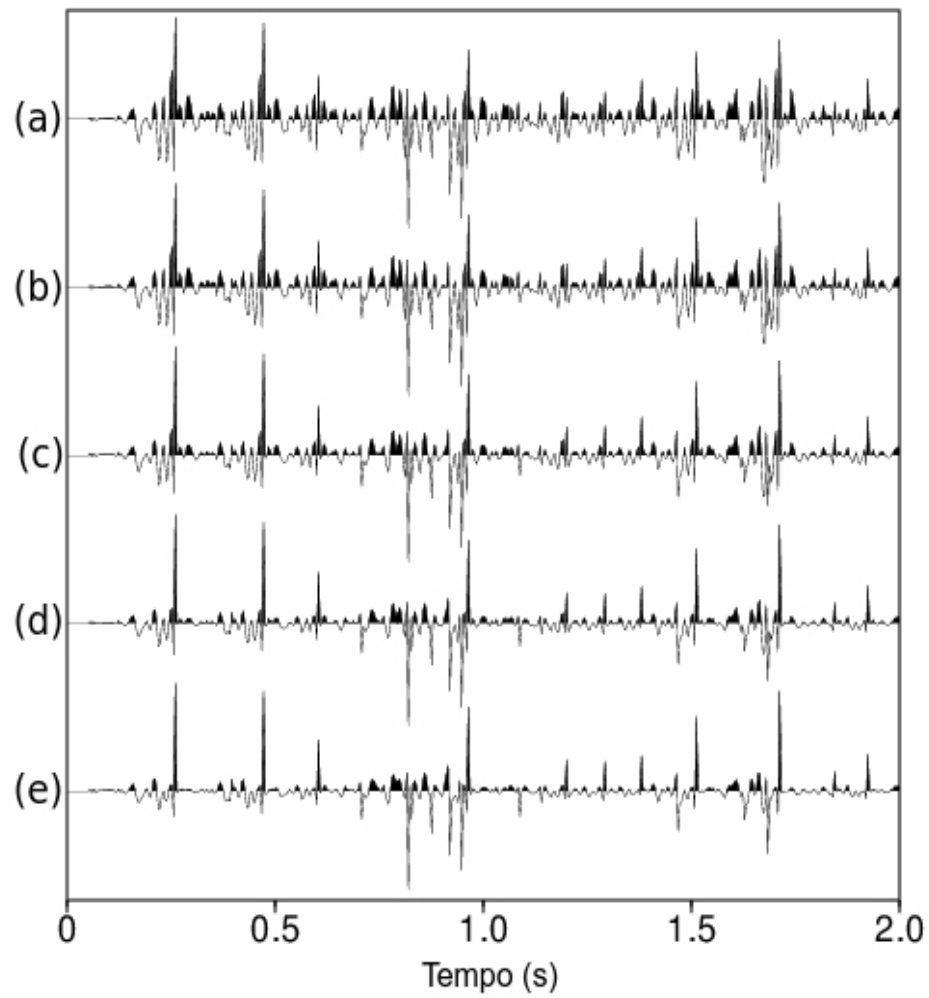


Figura 3.6: Deconvolução de um traço sintético com diversos valores de p : (a) $p = 2$; (b) $p = 1,8$; (c) $p = 1,5$; (d) $p = 1,3$ e (e) $p = 1$.

CAPÍTULO 4

Aplicação dos Métodos em Dado Real

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados alcançados através do método de filtragem adaptativa no domínio da frequência (SVD_{df}), da deconvolução de Wiener-Lenvinson (DWL) e da deconvolução iterativa com norma L_p (DIL_p).

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*.

A abordagem utilizada foi avaliar cada método dentro de sua particularidade, melhorar qualidade da análise de velocidade através da filtragem SVD_{df} , mostrar que essa filtragem pode ser associada com outro tipo de filtro, escolheu-se o F-K, por fim associar o melhor resultado de filtragem com aquele melhor de deconvolução. Os resultados, são sempre comparados com o dado original, com a finalidade de analisar quais as melhorias alcançadas.

O dado sísmico utilizado foi a linha sísmica de reflexão 50—RL—90 da Bacia do Tacutu, disponível no CPGG—UFBA para fins acadêmicos. Seus parâmetros de aquisição sísmica podem ser conferidos na tabela abaixo.

Parâmetros de Aquisição Sísmica	
Lanço (m)	2500-150-0-150-2500
Tempo de registro (s)	4
Intervalo de amostragem (ms)	4
Grau de cobertura (%)	1200
Intervalo entre pontos de tiros (m)	200
Distância entre geofones (m)	50
Número de canais	96

Tabela 4.1: Parâmetros de Aquisição da Linha Sísmica 50-RL-90.

4.1 Filtros SVD no Domínio da Frequência

A filtragem adaptativa SVD_{df} tem como parâmetros a serem definidos o tamanho da janela com L traços, o número de refinamentos (N_{ref}) e a banda de frequência na qual o método deve atuar. Juntos, tais parâmetros definem o filtro SVD_{df} considerado ideal que terá como tarefa atenuar o *ground roll* presente no dado sísmico.

O processo de determinação desse filtro ideal, consiste em analisar o efeito do tamanho da janela com L traços a ser escolhida, mantendo o número de refinamento em valor fixo. Após determinar qual o tamanho satisfatório da janela, fixa-se esse valor e varia-se o número de refinamentos ampliando ou reduzindo seu valor, até que a combinação de L e N_{ref} resulte no melhor filtro SVD_{df} . A banda de frequência deve ser entre frequência média na qual o *ground roll* aparece e a frequência máxima do espectro do dado, que nesse caso foi escolhida de 7 – 125Hz.

4.1.1 Analisando os Efeitos do Tamanho da Janela

Para a aplicação da filtragem adaptativa SVD_{df} levando-se em conta a variação do número L de traços, fixou-se o número de refinamento em $N_{ref} = 15$. Variou-se o número de traços coletados para a aplicação do método SVD_{df} . Para cada L , ímpar, escolhido é feita a reconstituição do traço central, assim se $L=5$ o traço reconstituído será de número 3. Por reconstituído entende-se aquele formado pelo método SVD através da primeira autoimagem.

Na Fig. 4.1 estão dispostos sismogramas que exibem o efeito na atenuação do *ground roll* quando mudamos o tamanho da janela L . Observe que para $L=5, 15, 25, 35, 95$, percebe-se que quanto maior for o valor de L menos eficiente será a filtragem do *ground roll*. Isso acontece porque se escolhermos L muito grande, esses traços sísmicos não possuem conteúdo de frequência na zona de existência do ruído, não há por isso um conteúdo de frequência correlacionável com a mesma banda da frequência do ruído.

Percebe-se que quando $L=25$ (Fig. 4.1(d)) atenua-se bastante o *ground roll* de tal maneira que esse valor será o de parametrização de L .

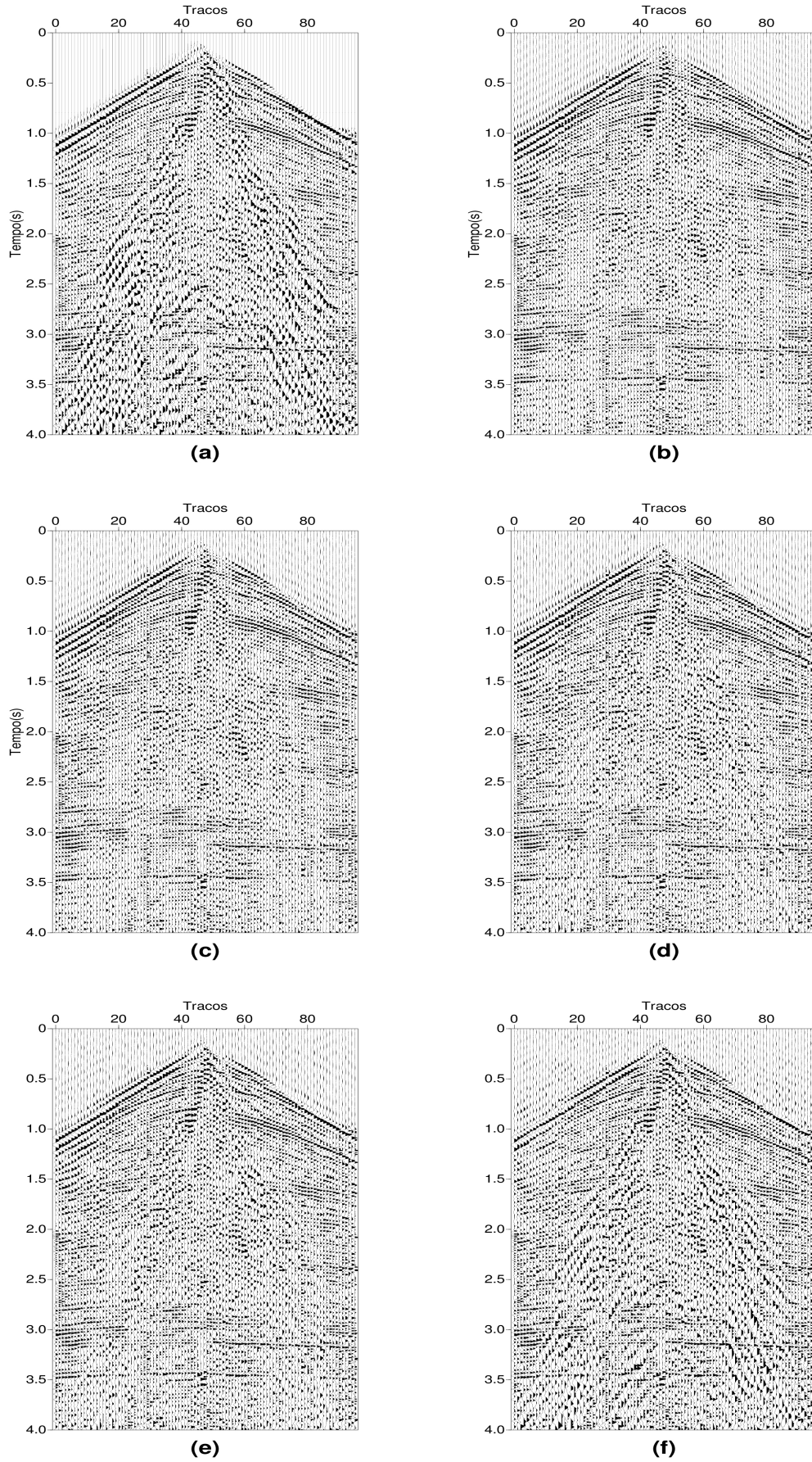


Figura 4.1: Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} com $L = 5$; (c) $L = 15$; (d) $L = 25$; (e) $L = 35$ e (f) $L = 95$.

4.1.2 Analisando os Efeitos do Número de Refinamento

Uma vez já definidos o valor de $L = 25$ e a banda de frequência, parte-se em busca do número de refinamento. Como descrito anteriormente, o N_{ref} indica o número de vezes que se deve tomar a diferença entre o espectro original e espectro SVD para que o espectro filtrado resultante seja o ideal.

Nas Figs. 4.2(b)-(f) é possível notar que quando o N_{ref} é cada vez maior, há uma melhora significativa na filtragem do *ground roll*. O que nos indica que, cada vez que o espectro SVD é calculado, melhor ele se concentra na zona de influência do ruído. E isso consequentemente fornecerá um espectro filtrado melhor.

Com base nos sismogramas filtrados, escolheu-se o $N_{ref} = 20$ como sendo o ideal, pois filtrou bem o dado e apresentou resultado semelhante aos N_{ref} superiores.

Por tanto, o filtro SVD_{df} ideal escolhido é aquele com $L=25$ e $N_{ref} = 20$. A aplicação desse filtro parametrizado, pode ser vista na Fig. 4.3. Observe que o *ground roll* bastante evidente na Fig. 4.3(a) foi bastante atenuado, exibindo como resultado um sismograma com melhores reflexões que antes estavam encobertas pelo ruído (Fig. 4.3(b)). O resíduo (Fig. 4.3(c)), entre o dado original e o filtrado, tem como feição o próprio ruído, além de onda direta.

O espectro de amplitude médio dos sismogramas da Fig. 4.3, é mostrado na Fig. 4.4. Nota-se que o filtro SVD_{df} , atua muito bem, concentrando-se dentro da faixa de frequência do ruído, o que está materializado pelo espectro do resíduo. Indicando-nos que a região de atuação do filtro foi bem direcionada na zona do *ground roll*.

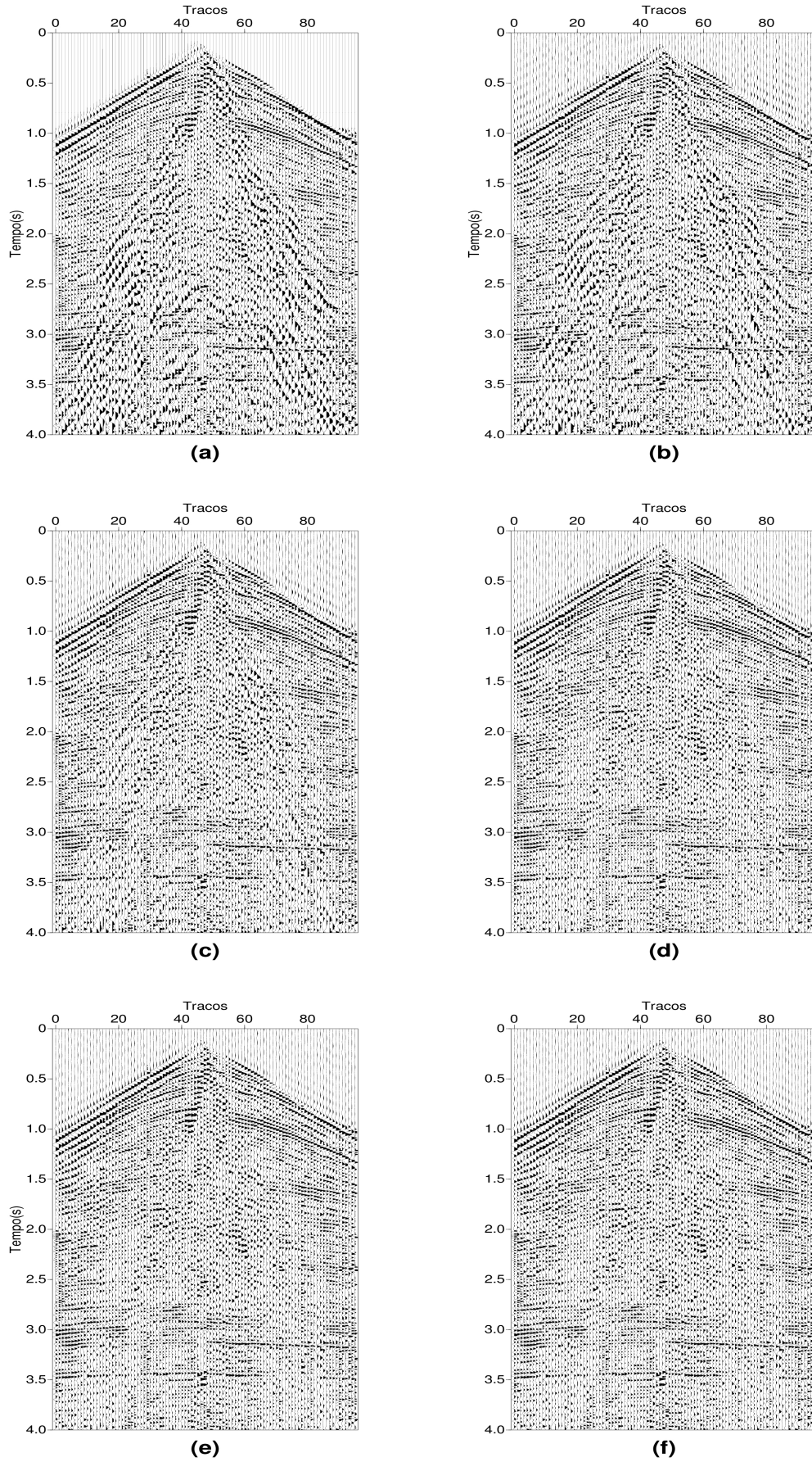


Figura 4.2: Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 3$; (c) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 10$; (d) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 20$; (e) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 30$ e (f) Filtro SVD_{df} com $N_{ref} = 40$.

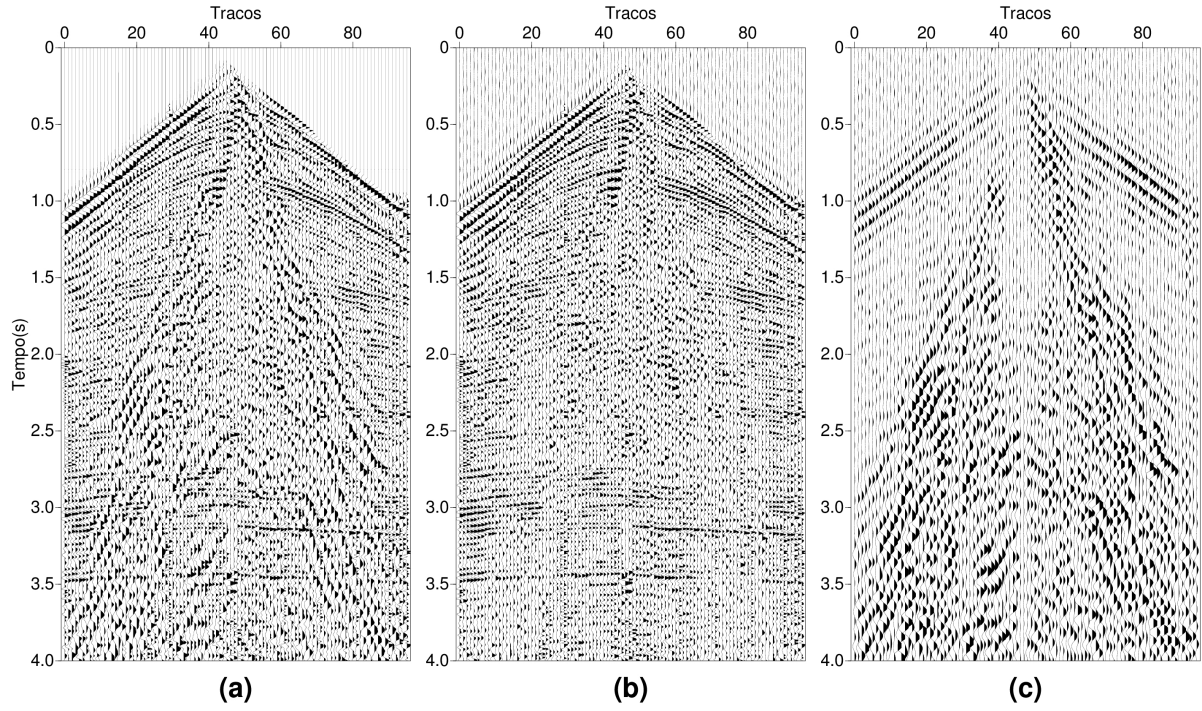


Figura 4.3: Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} $L = 25$ e $N_{ref} = 20$ e (c) Resíduo.

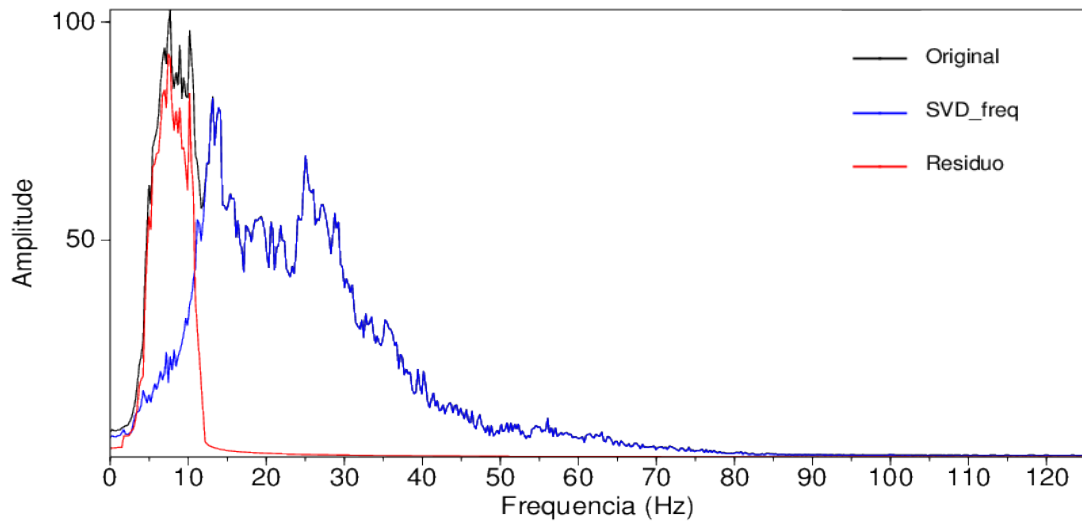


Figura 4.4: Espectro de amplitude médio: Original, Filtro SVD_{df} com $L = 25$ e $N_{ref} = 20$ e Resíduo.

4.1.3 Atuação em Conjunto da Filtragem SVD_{df} com a Filtragem F-K

A filtragem F-K é bidimensional, pois atua no domínio da frequência f e número de onda k ao mesmo tempo. Nela, as faixas de atenuação do ruído são definidas pelos *slopes*, obtidos pela razão entre número de onda e frequência de atenuação, que varrem a região que se deseja filtrar. Em seu espectro F-K, os eventos que nos sismogramas são horizontais, como reflexões, ficam dispostos na vertical, e eventos mais verticais no sismograma se concentram na direção horizontal no domínio F-K. Dessa forma, o *ground roll* se concentra na parte horizontal-superior do espectro, e as reflexões são dispostas na região vertical-central. Maiores detalhes podem ser conferidos em (Yilmaz, 2001). Nessa abordagem a faixa de frequência utilizada para o F-K foi $f = \{2, 10, 25 \text{ e } 40\}$ Hz.

Na Fig. 4.5(a) é exibido o sismograma original, Fig. 4.5(b) o filtrado com SVD_{df} e na Fig. 4.5(c) a atuação em conjunto da filtragem $SVD_{df} + \text{F-K}$. Observe que o filtro F-K realçou aquelas reflexões exibidas pela filtragem SVD_{df} quando o *ground roll* foi atenuado. Os respectivos espectros F-K podem ser conferidos na Fig. 4.6. Nesse domínio F-K, observe que no dado original o *ground roll* está bem visível na parte horizontal-superior do espectro, situado no domínio das baixas frequências. Ao compararmos o espectro F-K do dado filtrado com SVD_{df} , Fig. 4.6(b), é simples notar que o ruído não está mais presente e que a região central tem seus valores realçados, indicando-nos que a filtragem com SVD_{df} também aumenta a coerência do dado filtrado. Na Fig. 4.6(c) o espectro do dado filtrado com F-K varreu o restante das porções de baixo número de onda na faixa de frequência escolhida para atenuação, melhorando ainda mais a porção central, o que eventualmente pode-se traduzir como um número maior de reflexões.

Diante disso, percebe-se que pode ser vantajoso conciliar mais de um método de filtragem, extraindo-se o melhor de cada um deles e contribuindo para o aumento da razão sinal/ruído do dado sísmico.

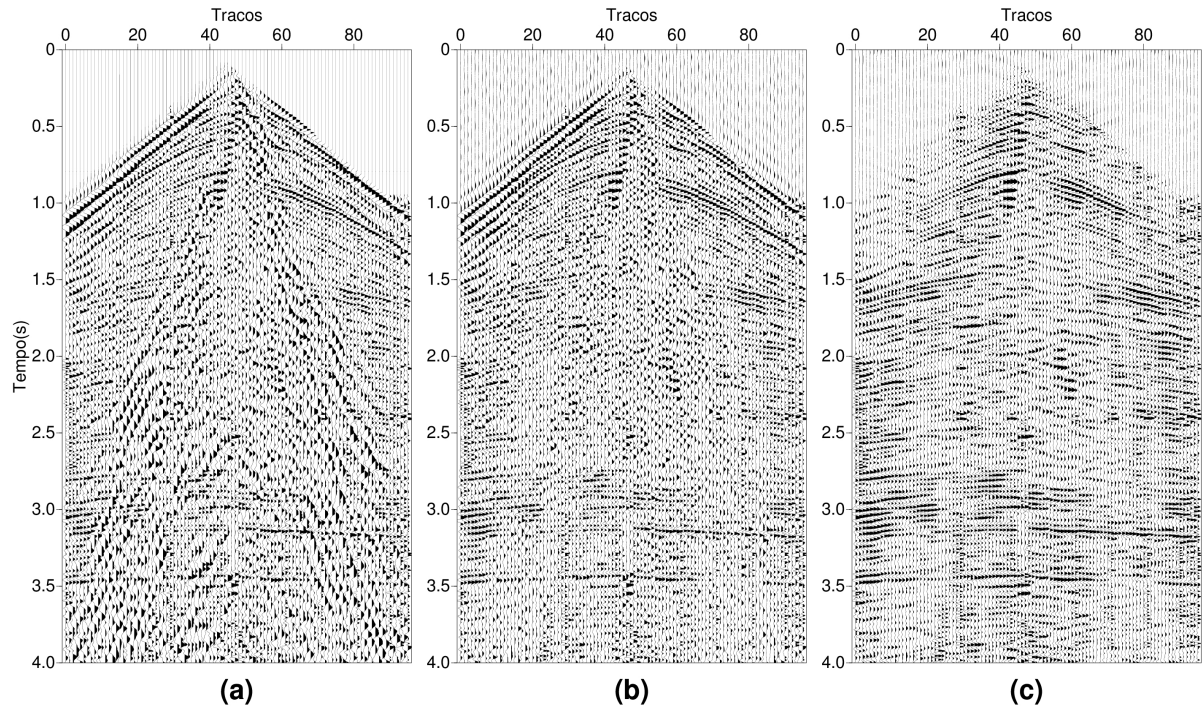


Figura 4.5: Sismogramas: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} e (c) Filtro SVD_{df}+F-K.

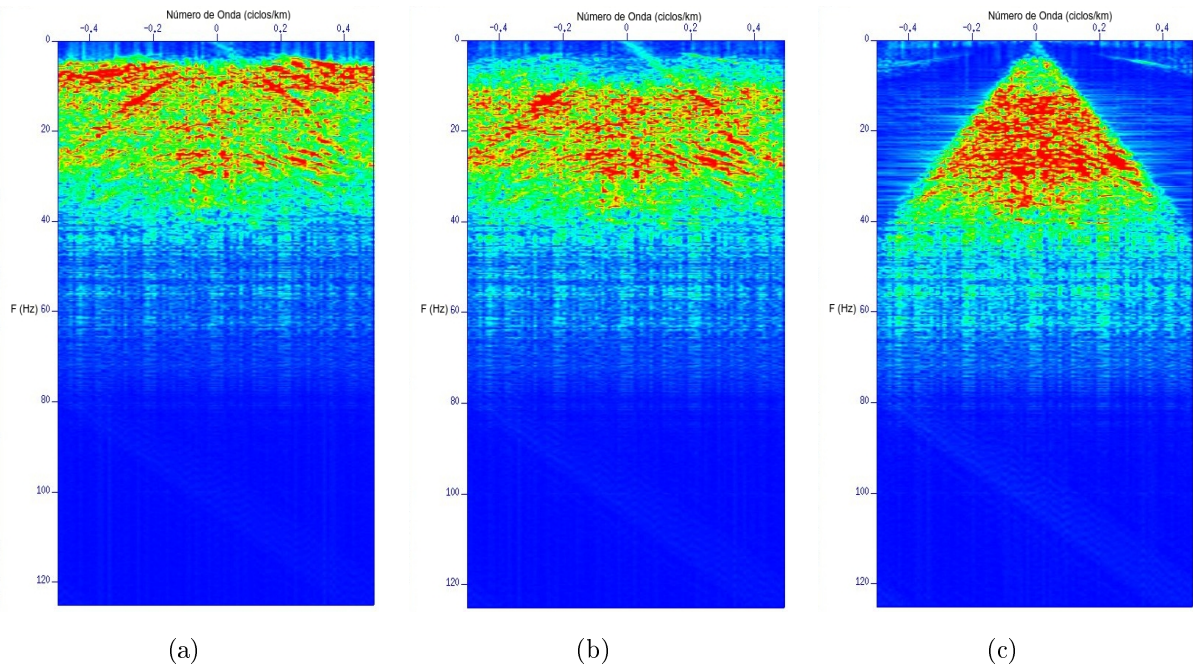


Figura 4.6: Espectro F-K: (a) Original; (b) Filtro SVD_{df} e (c) Filtro SVD_{df}+F-K.

4.2 Deconvolução WL

A filtragem do *ground roll* com a DWL foi testada para vários coeficientes, mas percebeu-se que quando o número de coeficientes é superior a 2, o método atua de forma muito severa, aniquila muita informação o que torna inadequado sua aplicação para atenuação do ruído e aumento da resolução temporal do dado deconvolvido.

Observe que a Fig. 4.7 ilustra sismograma original, contaminado pelo ruído, seguido dos sismogramas deconvolvidos com $n = 1$ e $n = 2$ coeficientes. Quando é utilizado um filtro com $n = 2$, atenua-se o ruído, mas o resultado não é satisfatório já que essa filtragem é muito severa.

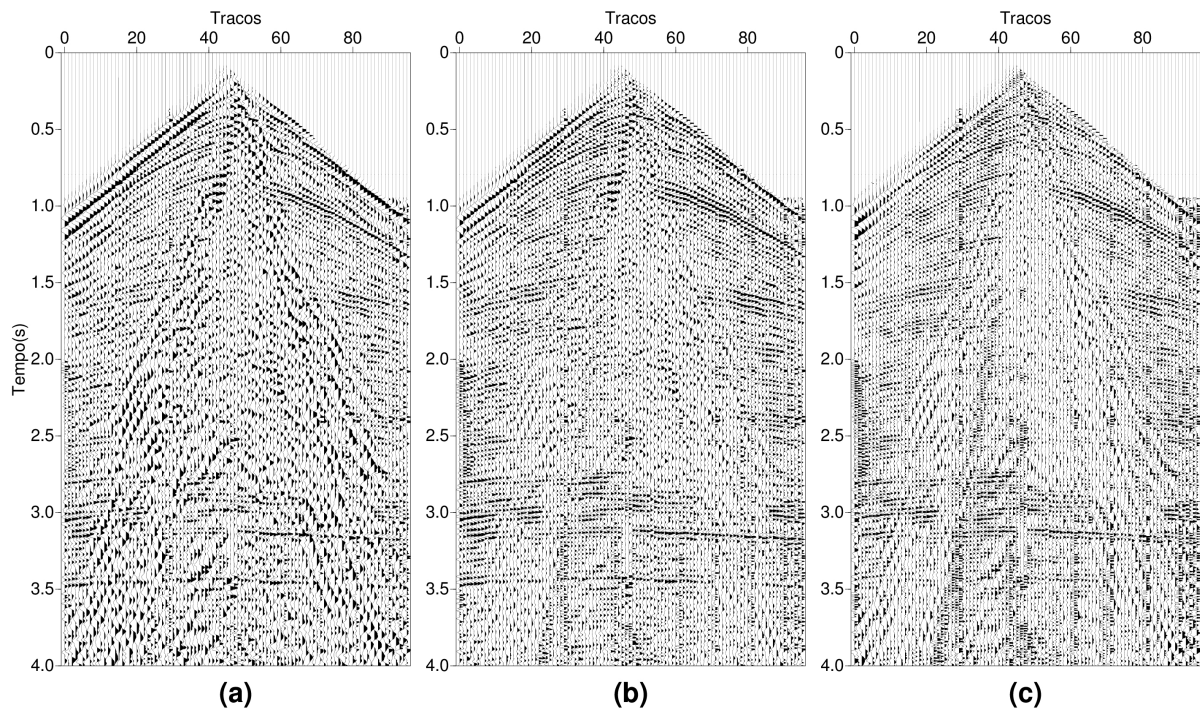


Figura 4.7: Sismogramas WL: (a) Original; (b) Deconvolvido WL com filtro de 1 coeficiente; (c) DWL com 2 coeficientes.

A Fig. 4.8 exibe o espectro de amplitude médio do dado original e deconvolvido com $n = 1$ e $n = 2$ coeficientes. Se o filtro utiliza $n = 2$ coeficientes, vemos que o espectro do dado filtrado é muito reduzido quando comparado com o original.

Por isso, o sismograma filtrado com $n = 1$ é o escolhido. Veja que consegue-se manter o equilíbrio e atenuar o *ground roll*, comprimir as reflexões (aumentar resolução temporal) e não aniquilar as informações de interesse.

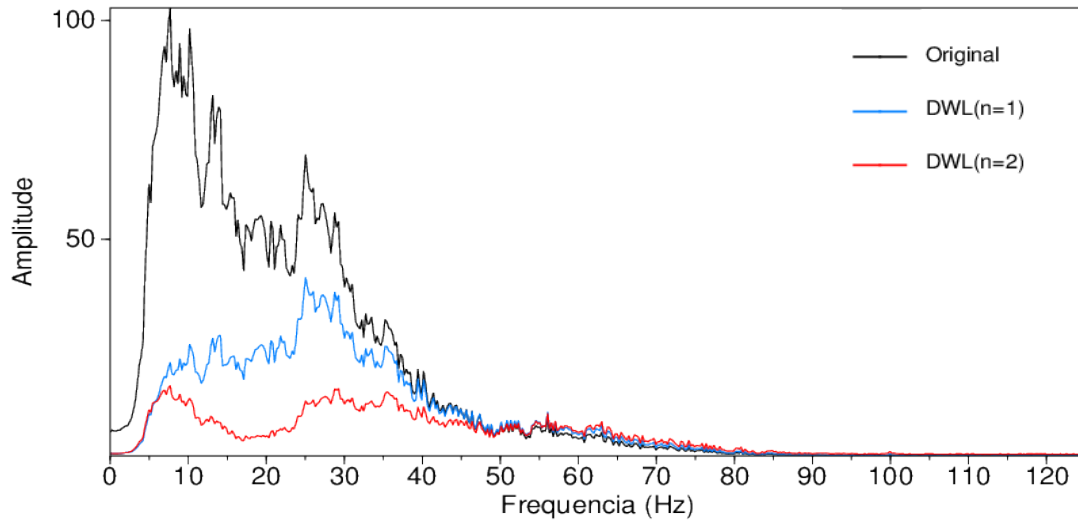


Figura 4.8: Espectro de amplitude médio: Original e DWL com $n = 1$ e $n = 2$ coeficientes.

4.3 Deconvolução Iterativa com Norma L_p

O mesmo procedimento empregado na seção anterior foi utilizado para a DIL_p . A eficiência da atenuação do *ground roll* é avaliada por meio do número de coeficientes do filtro, o valor da norma L_p e o número de iterações. Utiliza-se uma norma com $p = 1, 3$ e número de iterações igual a 10.

Através dos sismogramas deconvolvidos (Figs. 4.9(b) e (c)), podemos ver novamente que o filtro com $n = 2$ não atuou bem, praticamente zerando todos os eventos, de maneira até mais severa que a DWL. Sendo assim, descarta-se o uso desse filtro e permanece com $n = 1$. Na Fig. 4.10 temos o espectro de amplitude para cada um dos sismogramas, no qual é possível ver que quando a filtragem é realizada com $n = 1$, atenua-se a banda de baixa frequência correspondente ao *ground roll*, no entanto se $n = 2$ o espectro chega-se perto do limite.

Ambos métodos, DWL e DIL_p , foram aplicados sozinhos e posteriormente com a filtragem SVD_{df} .

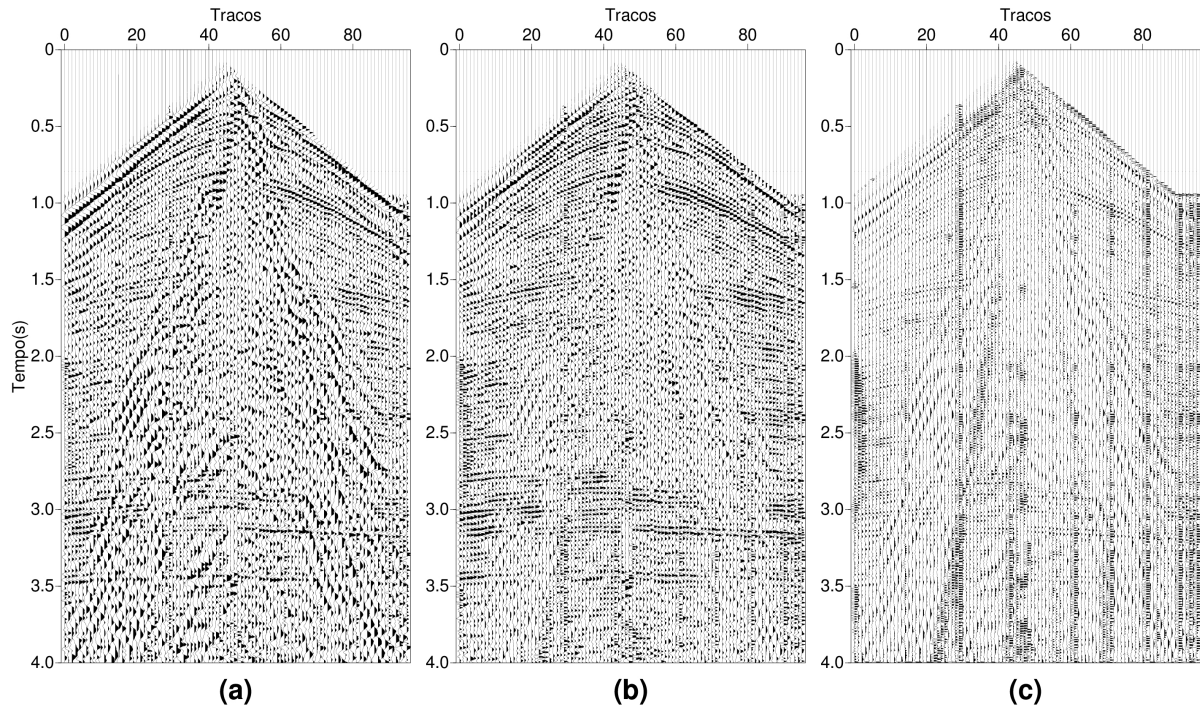


Figura 4.9: Sismogramas DIL_p : (a) Original; (b) DIL_p e filtro com 1 coeficiente; (c) DIL_p com 2 coeficientes.

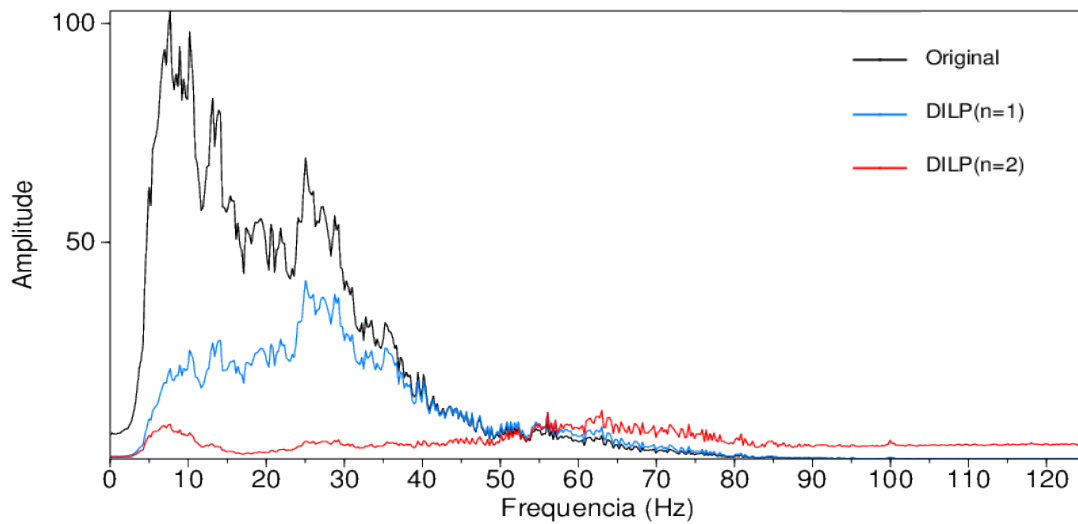


Figura 4.10: Espectro de amplitude médio: Original e DIL_p com $n = 1$ e $n = 2$ coeficientes.

4.4 Análise de Velocidade

A análise de velocidade é uma importante etapa do processamento de dados sísmicos, consiste em determinar as velocidades corretas das camadas em subsuperfície. Bem como, definir quais os valores de velocidade que melhor horizontalizam as reflexões quando aplicada a correção *normal moveout* (NMO). Com o dado sísmico organizado em famílias de ponto médio comum (CMP), deve-se marcar corretamente os *picks* de maior coerência nos painéis *semblances*, que ocorrem ao longo da trajetória hiperbólica da reflexão em subsuperfície.

Se a razão sinal/ruído do dado é baixa a tendência é a presença de poucos pontos de coerência nos painéis *semblances* e a análise de velocidade não é adequada, pois fica difícil saber qual valor de velocidade melhor corrige de NMO. Através da aplicação de métodos de filtragem é possível realçar os painéis de *semblances*, uma vez que ruídos, antes mascaravam as reflexões, são removidos após a filtragem.

Com o objetivo de avaliar a melhoria na análise de velocidade por meio da filtragem SVD_{df} , analisaremos de duas maneiras. Na primeira, análise de velocidade é realizada com o dado sísmico sem que nenhum método de filtragem tenha sido aplicado, e com o campo de velocidades resultante corrige o dado bruto de NMO e empilha, gerando a seção sísmica original. Posteriormente, repete-se a análise de velocidade estando o dado com a filtragem SVD_{df} e com o novo campo de velocidade (SVD_{df}) faz-se correção NMO e empilha, gerando a seção sísmica filtrada.

As Figs. 4.11 e 4.12 ilustram um *supergather* do CMP 3425 e seu respectivo painel *semblance*. Comparando esse par de figuras, vemos que quando a filtragem SVD_{df} é aplicada, melhora significativamente o painel *semblance*, pois pontos de coerências mais fortes podem ser percebidos na porção mais profunda, que antes eram mascarados pelo *ground roll*. Essa melhoria nos painéis *semblances* pode ser percebida ao longo de todo o dado, e isso está ilustrado nas Figs. 4.13 e 4.14. Sendo assim, a aplicação da filtragem SVD_{df} melhora significativamente a análise de velocidade, ao longo de todo o dado sísmico.

Nas Figs. 4.15 e 4.16 são exibidos os campos de velocidades resultantes dessa análise de velocidade com o dado bruto e dado filtrado SVD_{df} , observe que há uma significativa diferença entre os campos. O campo de velocidades obtido com o dado filtrado SVD_{df} é mais suave e não exhibe passagens tão abruptas de velocidades, o que pode ser percebido nas fronteiras desses valores, onde tal mudança ocorre de forma mais gradual. No entanto, no campo de velocidades do dado bruto essa transição não ocorre de maneira tão comportada. Em virtude disso, pode-se dizer que o campo de velocidades do dado filtrado representa melhor os valores de velocidades em subsuperfície e conseqüentemente refletirá na qualidade da seção sísmica empilhada.

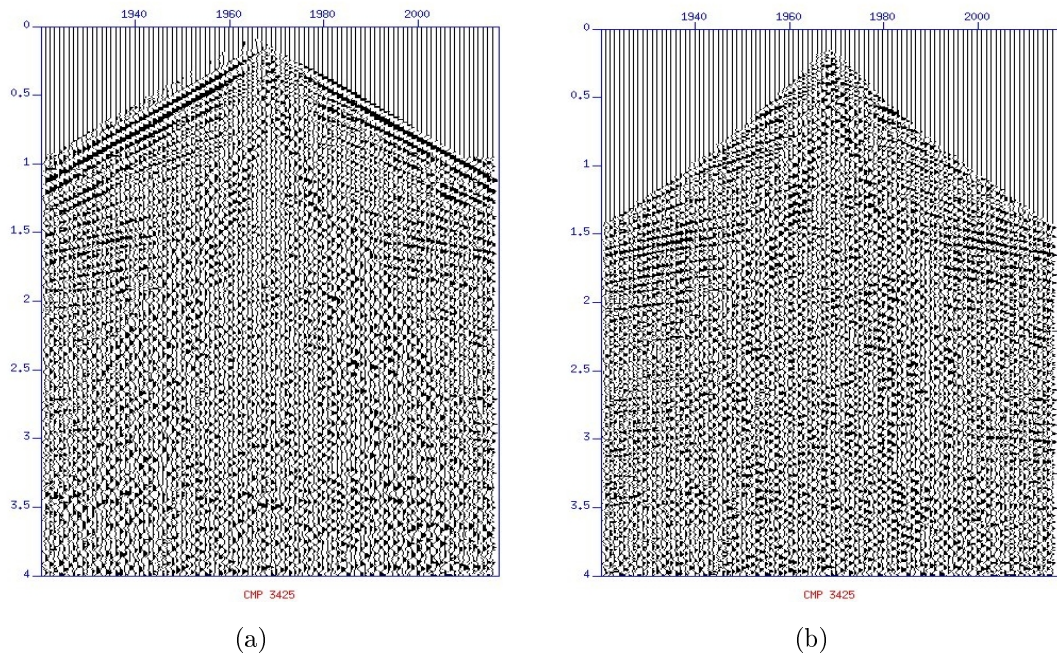


Figura 4.11: *Supergathers*-CMP 3425: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}

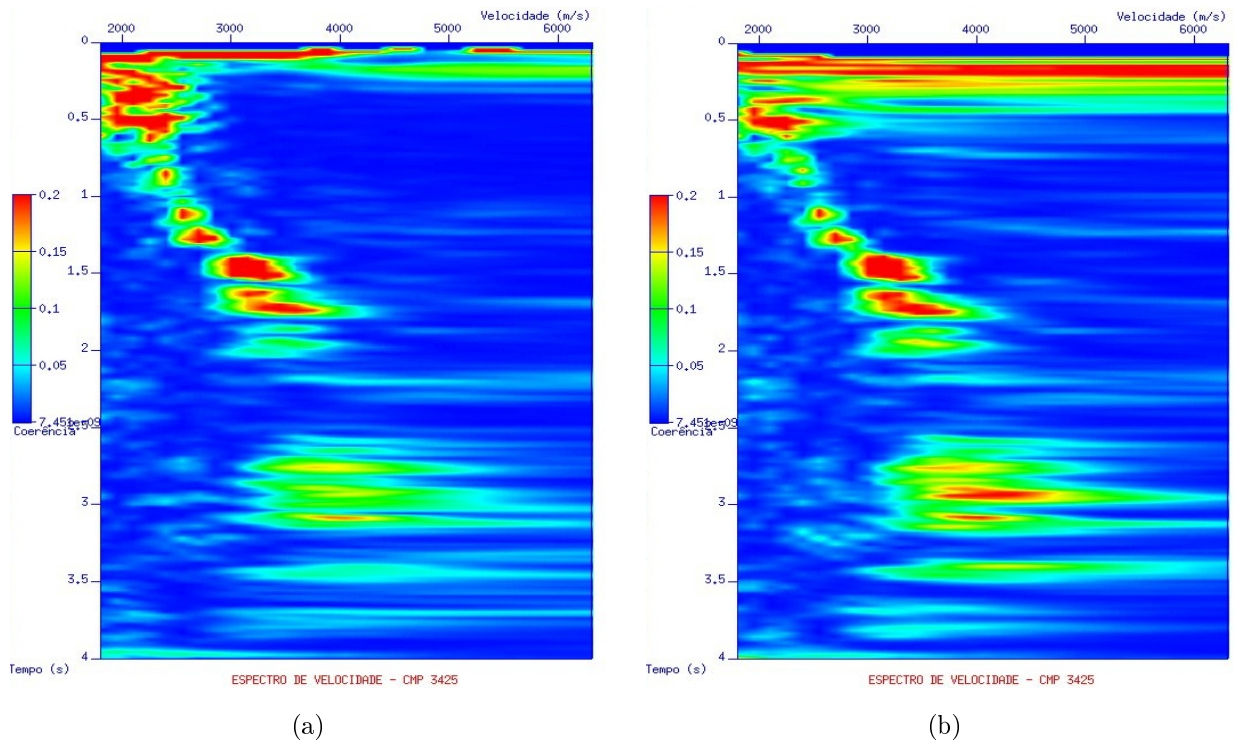


Figura 4.12: Espectro de Velocidades-CMP 3425: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}

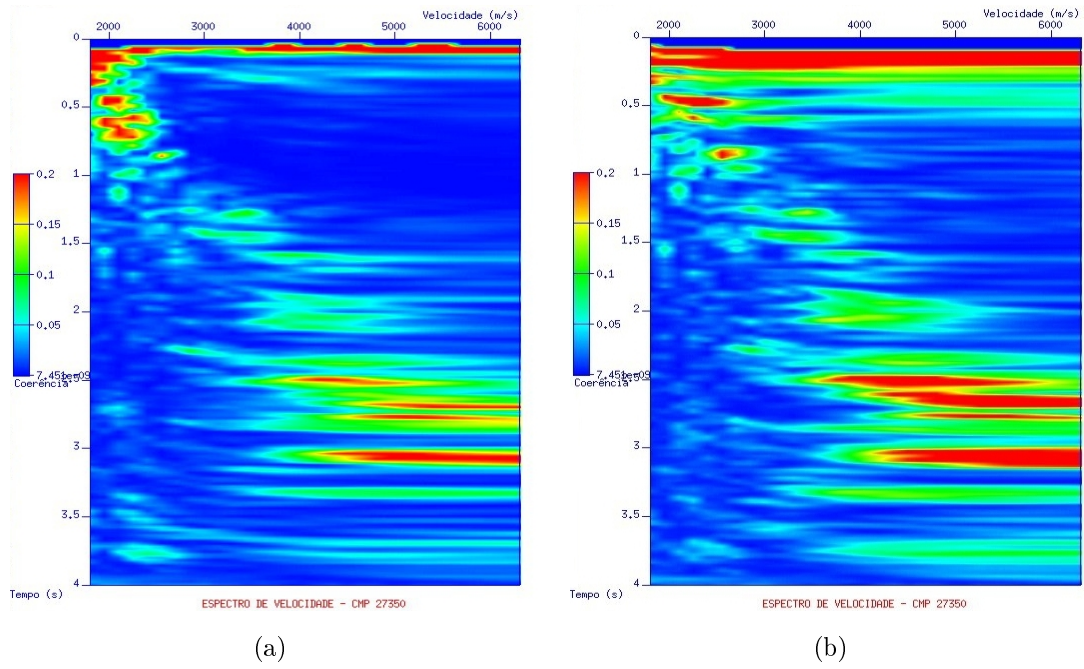


Figura 4.13: Espectros de Velocidades-CMP 27350: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}

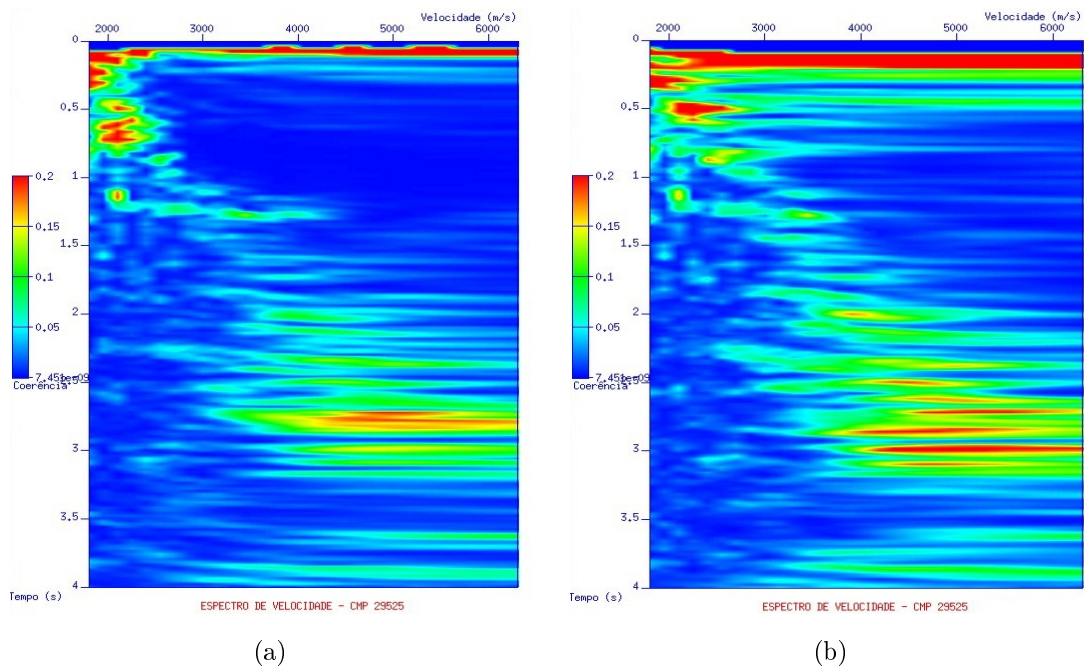


Figura 4.14: Espectros de Velocidades-CMP 29525: (a) Original; (b) Filtrado com SVD_{df}

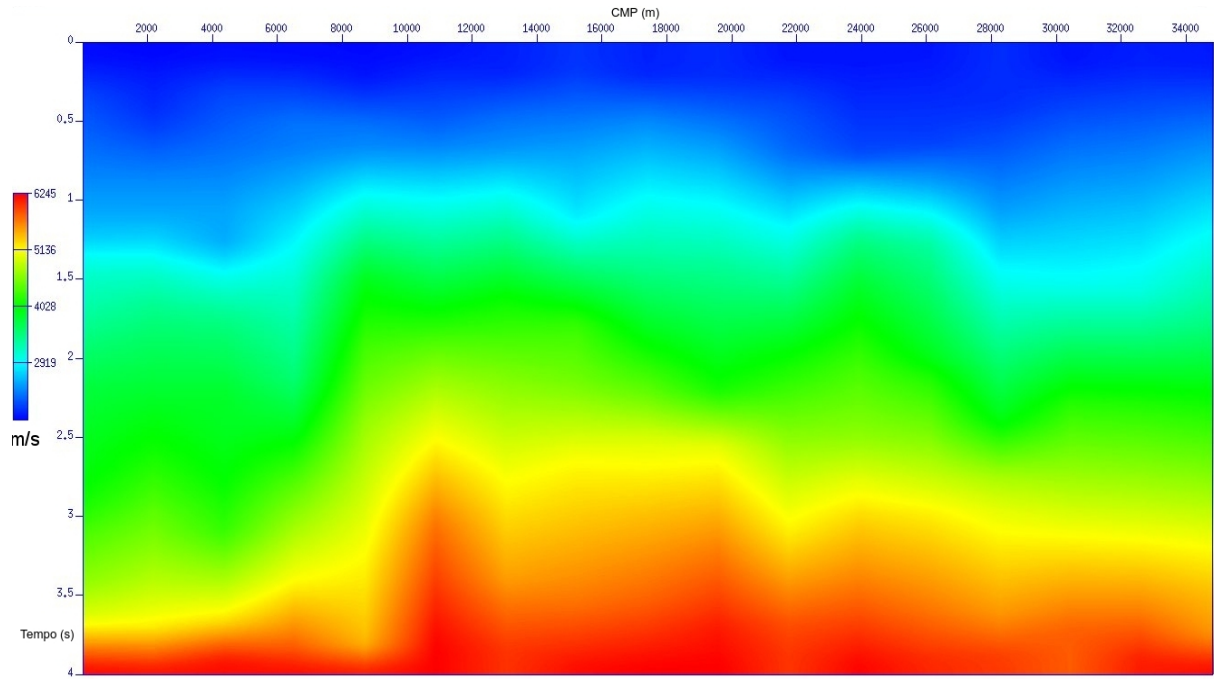


Figura 4.15: Campo de velocidades RMS obtido através da análise de velocidade do dado original.

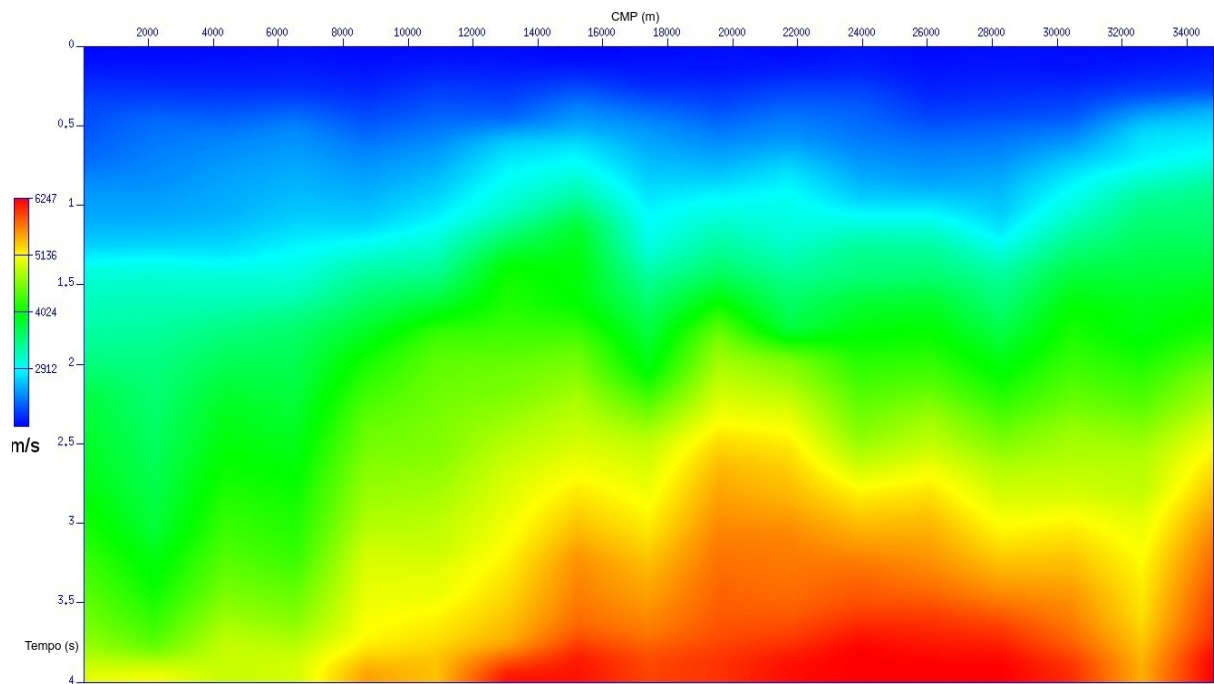


Figura 4.16: Campo de velocidades RMS obtido através da análise de velocidade do dado filtrado com SVD_{df} .

4.5 Seções Empilhadas

Nesta seção são apresentados os resultados finais atingidos através das aplicações dos métodos de filtragens e deconvoluções propostos. O fluxograma de processamento utilizado está ilustrado na Fig. 4.17.

Inicialmente fez-se o processamento sísmico do dado bruto, sem que nenhum método de filtragem lhe fosse aplicado, como resultado temos a seção empilhada original da Fig. 4.18. Ela serve para modelo de comparação dos efeitos e melhorias provocados pelas aplicações dos métodos de filtragens e deconvoluções.

A Fig. 4.19 mostra a seção sísmica empilhada quando foi aplicado a filtragem SVD_{df} e empilhada com o campo de velocidades SVD_{df} . Observe que a uma melhora significativa nesse resultado comparado ao exibido na seção original. A filtragem SVD_{df} melhorou a continuidade lateral das reflexões, além das mesmas serem mais evidentes, essa melhora pode ser vista ao longo de toda a seção sísmica, principalmente no trecho de 20km-final e tempo 0-3s, onde o número de reflexões aumentou.

Nas Figs. 4.20 e 4.21 temos os resultados das deconvoluções DWL e DIL_p ($p=1,3$), respectivamente, ambas com filtro de 1 coeficiente e empilhadas com o campo de velocidades SVD_{df} . As melhorias ainda podem ser percebidas, embora o dado esteja sem o filtro SVD_{df} , mas graças ao novo campo de velocidades consegue-se mostrar mais feições em subsuperfície quando comparamos com o dado original. Fazendo comparações entre essas duas deconvoluções, vê-se que são do mesmo modo eficientes, mas a DIL_p consegue ser melhor do que a DWL , pois suas reflexões são mais comprimidas e a resolução temporal da seção DIL_p é um pouco melhor.

A seção sísmica empilhada com a aplicação em conjunto da filtragem SVD_{df} e F-k é exibida na Fig. 4.22, vemos que a junção dessas duas filtragens mostra bons resultados melhorando ainda mais a qualidade da seção sísmica. O resultado é um pouco superior ao da seção filtrada somente com SVD_{df} , pois acentuou as reflexões um pouco mais.

Na seção sísmica da Fig. 4.23 vemos combinação das filtragens SVD_{df} e F-k e da deconvolução DIL_p . A associação desses três métodos foi muito satisfatória, melhorou bastante a qualidade da seção sísmica como um todo. Em diversos trechos da seção sísmica resultante, pode-se ver que o número de reflexões aumentou, assim como a continuidade lateral também melhorou, sendo por tanto os eventos bem delineados, contribuindo dessa forma para uma seção com qualidade muito superior a seção original, além de significativas melhorias em relações as seções geradas com os métodos separados.

Detalhes de dois diferentes trechos das seções sísmicas são ilustrados nas Figs. 4.24 e 4.25. O detalhe 1 correspondente ao trecho de distância 0-5 km na seção sísmica e o detalhe 2 ao trecho de distância 20-35 km. Esses detalhes, evidenciam que as filtragens funcionaram

bem, inclusive quando combinadas. Podemos ver que as reflexões melhoram para a parte rasa quanto para a profunda. No trecho de 1-3.5 s (Fig. 4.24) nota-se reflexões mais nítidas do dado filtrado. Melhora mais evidente pode ser percebida nas reflexões em termos de quantidade e continuidade lateral no dado filtrado (Fig. 4.25). Desse modo, pode-se notar uma melhora substancial nas seções filtradas e deconvolvidas, indicando que os métodos utilizados realizaram de maneira eficiente a tarefa de atenuar o *ground roll* e melhorar a razão sinal/ruído da seção sísmica final.

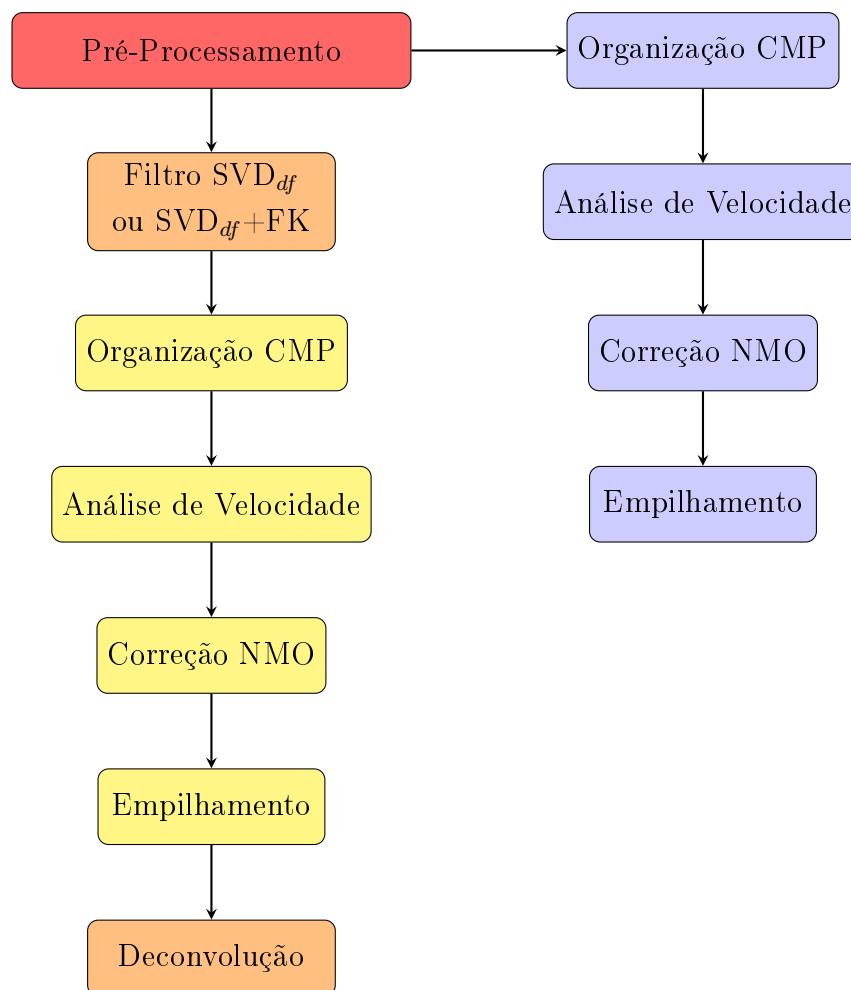


Figura 4.17: Fluxograma de Processamento.

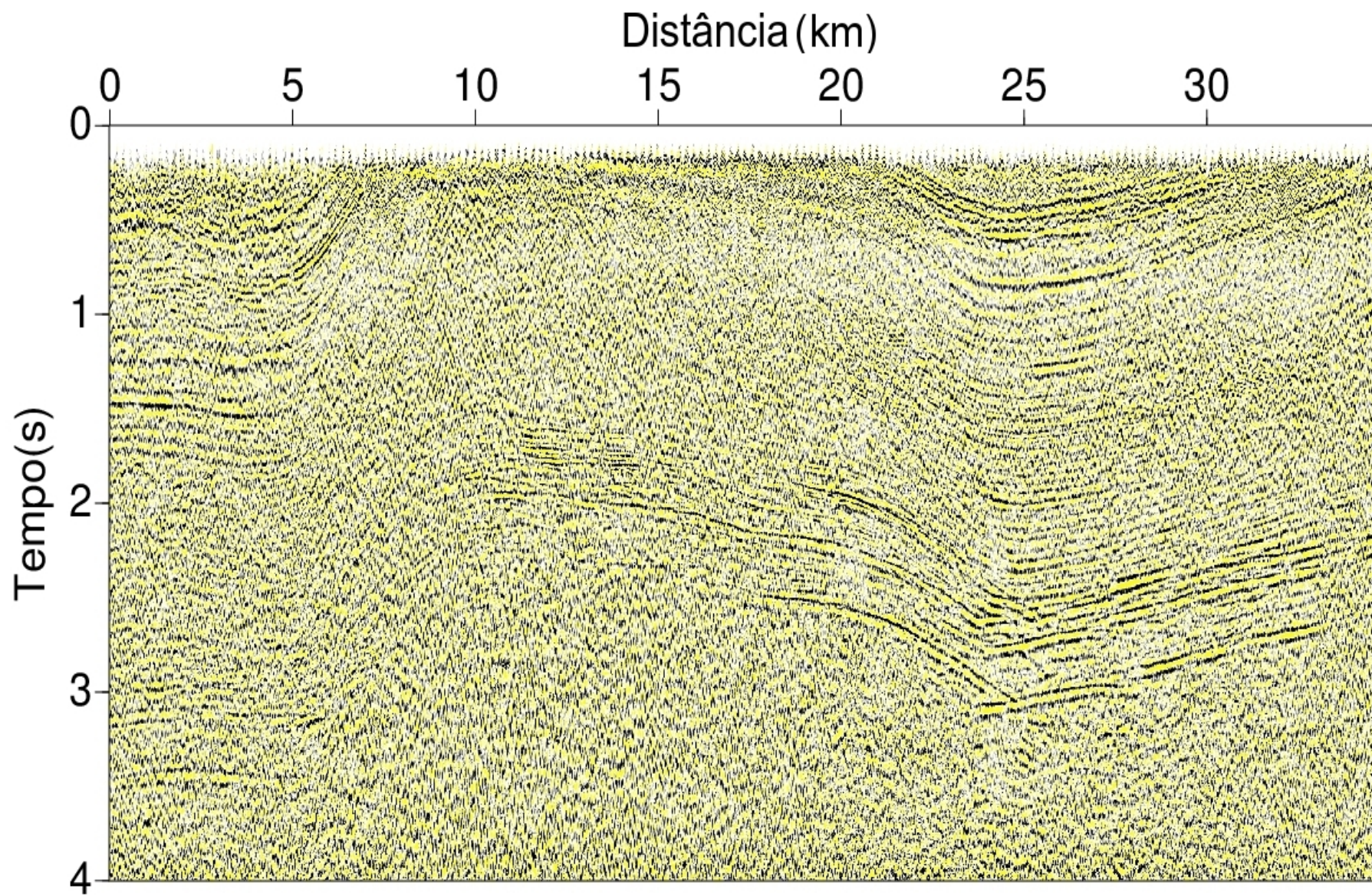


Figura 4.18: Seção empilhada original.

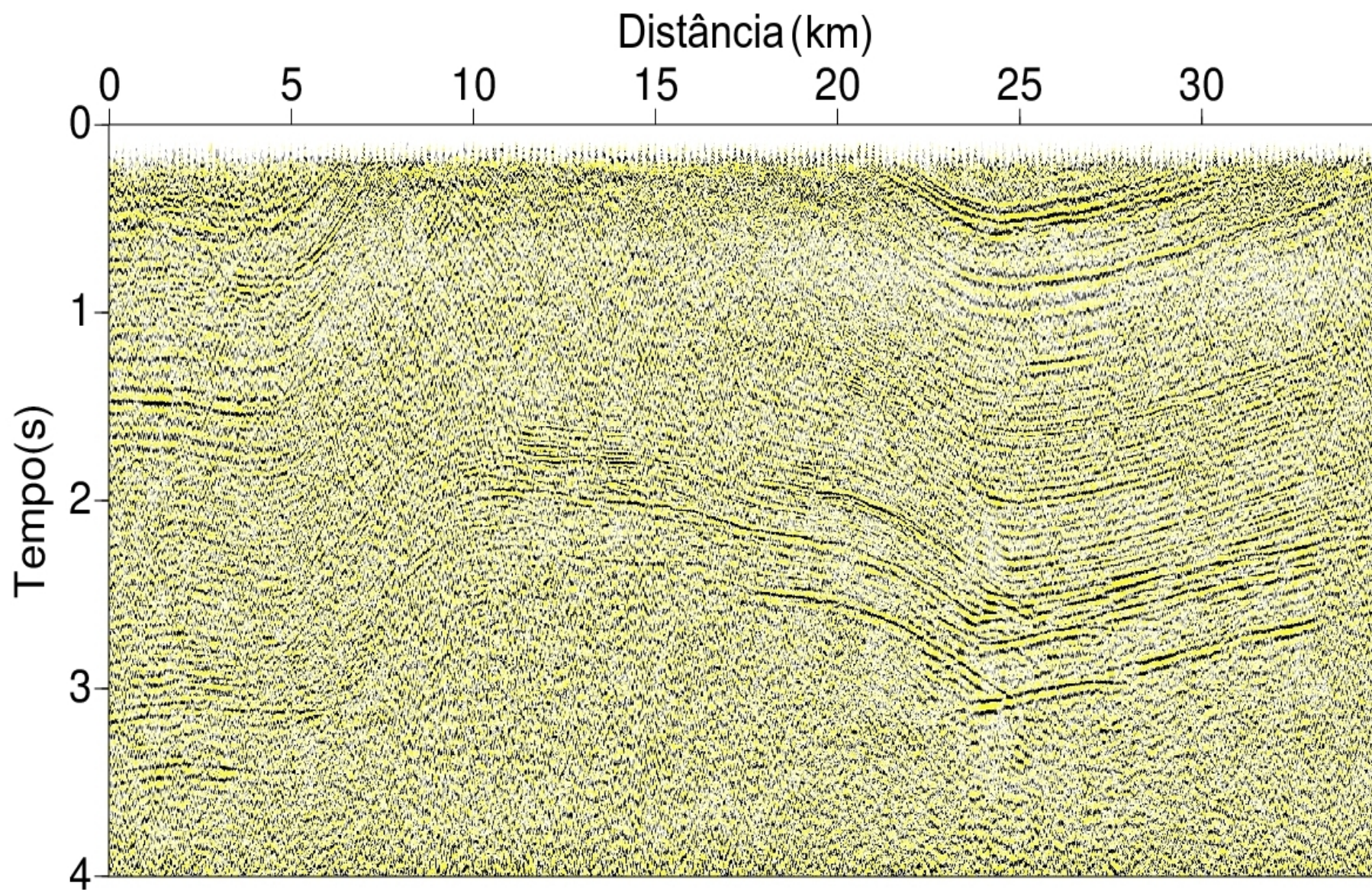


Figura 4.19: Seção empilhada com filtragem SVD_{df} .

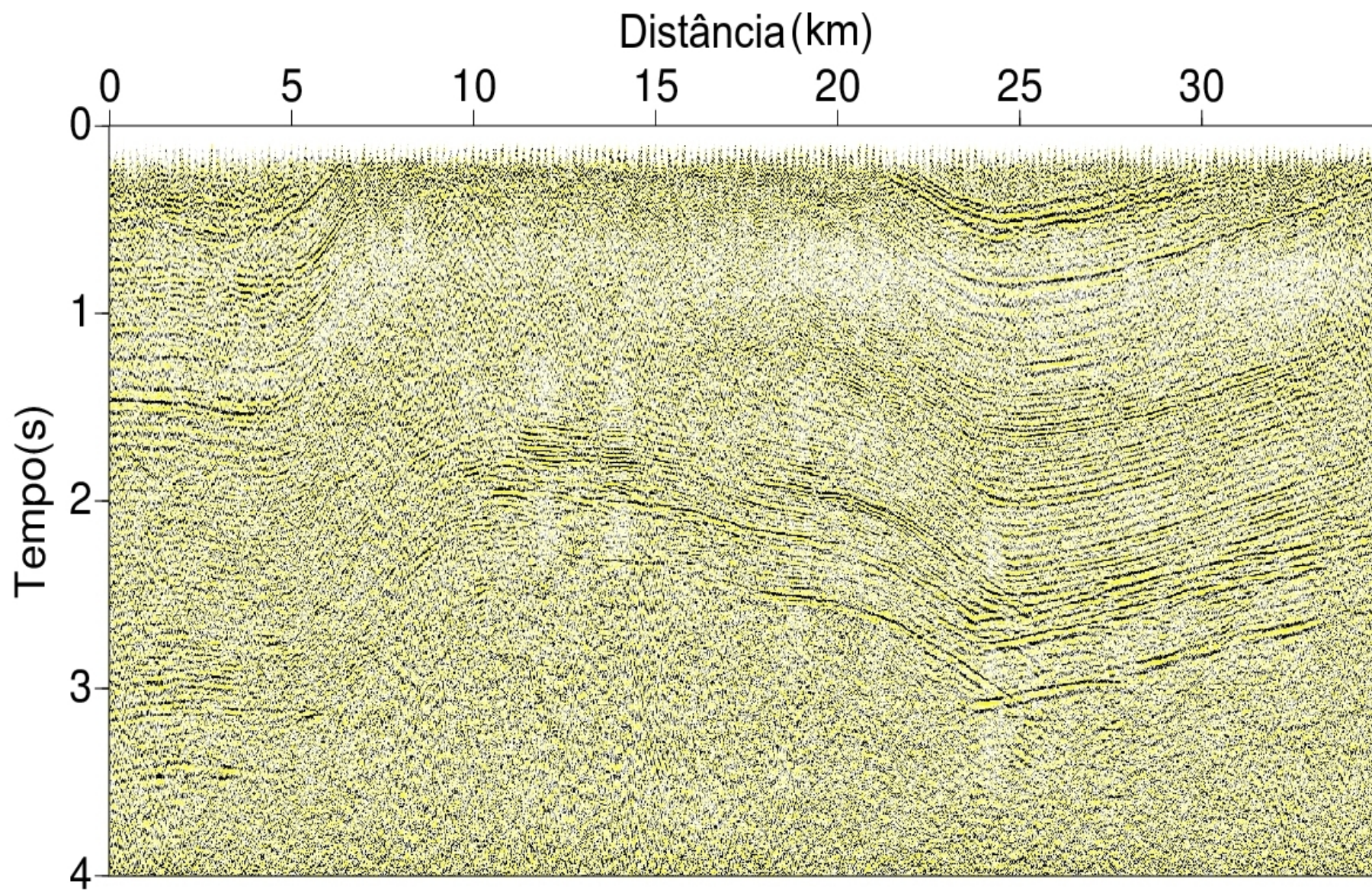


Figura 4.20: Seção empilhada com filtragem DWL.

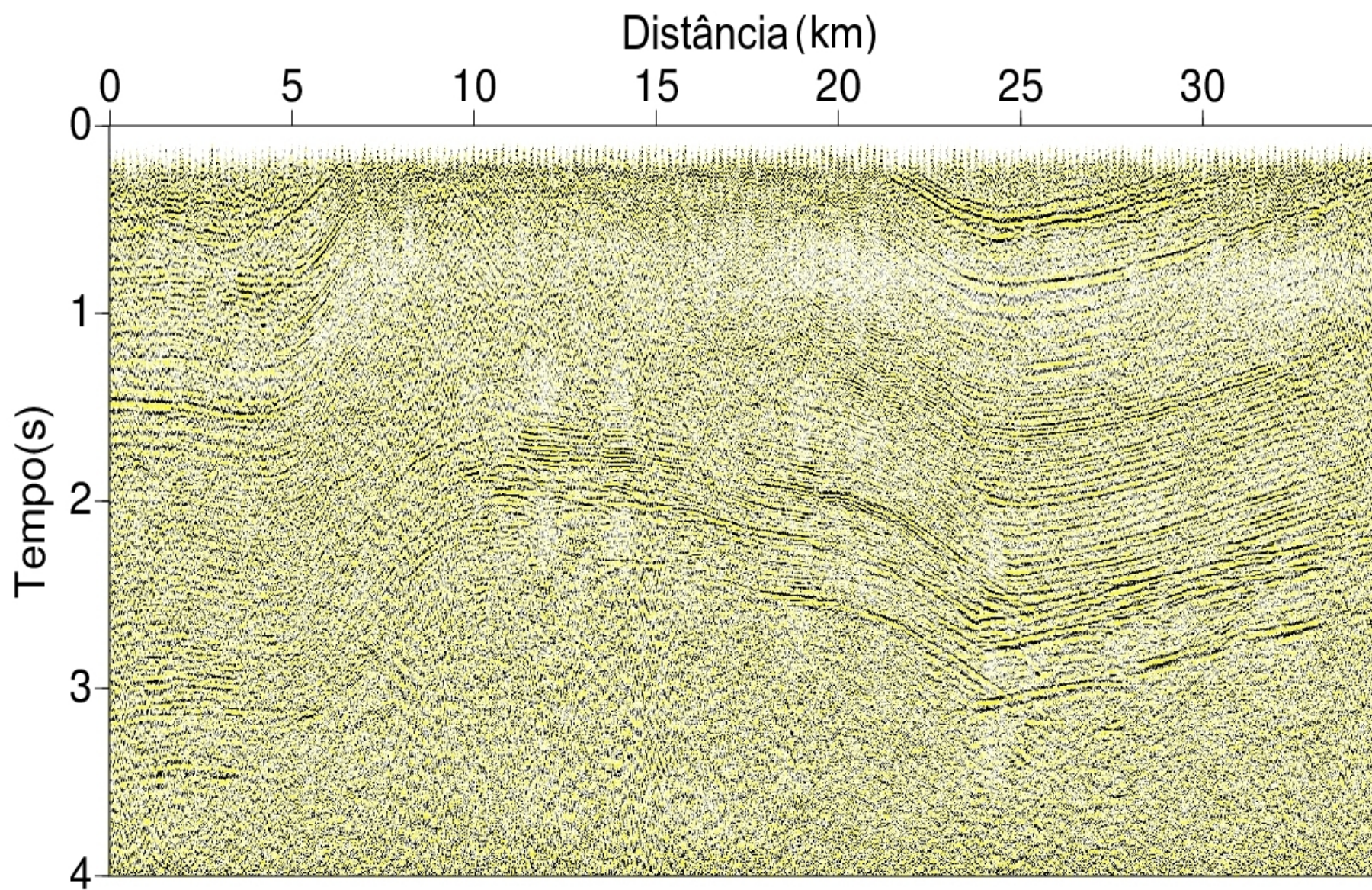


Figura 4.21: Seção empilhada com filtragem DIL_p .

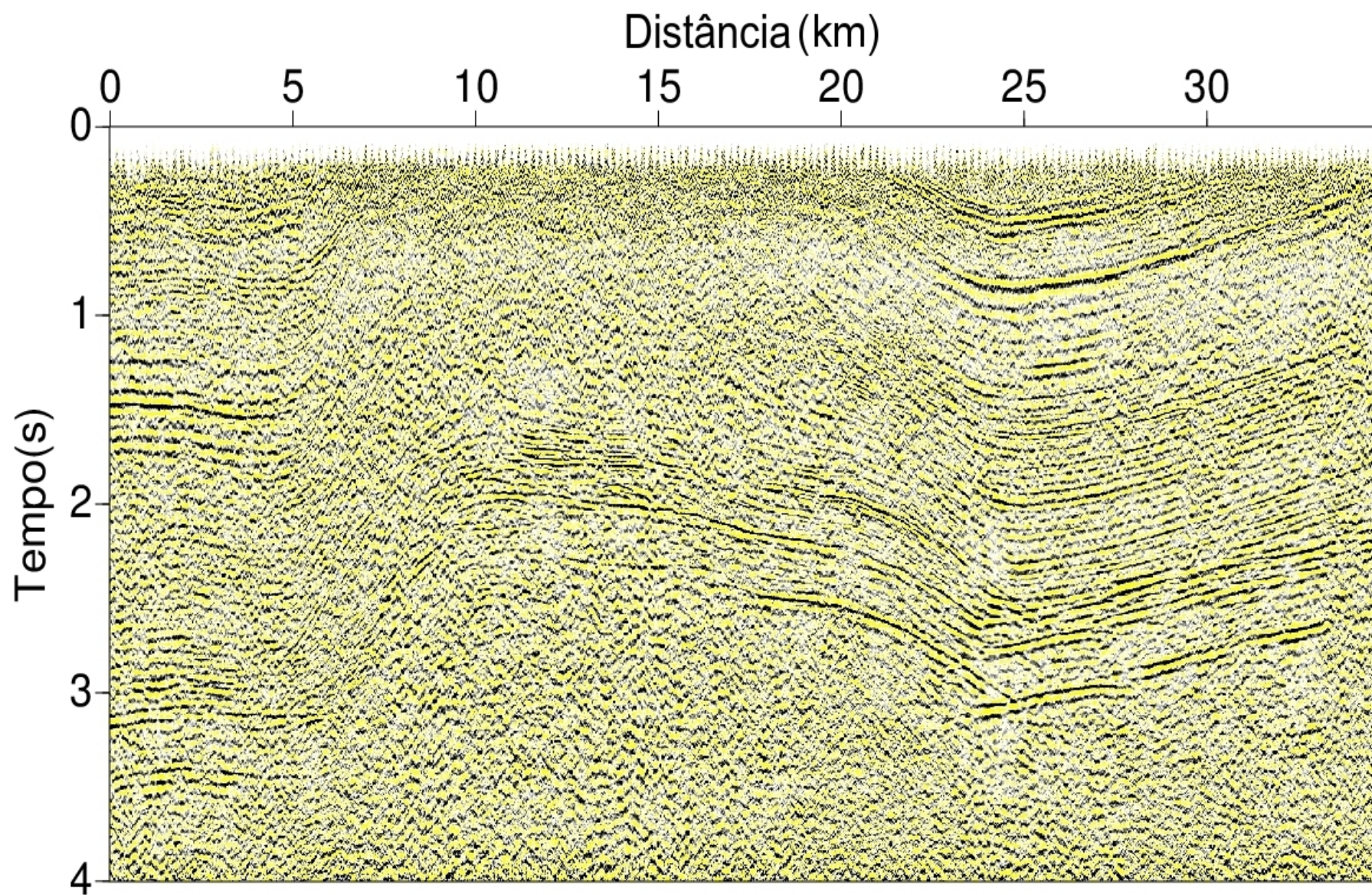


Figura 4.22: Seção empilhada com filtragem $F\text{-}K + \text{SVD}_{df}$.

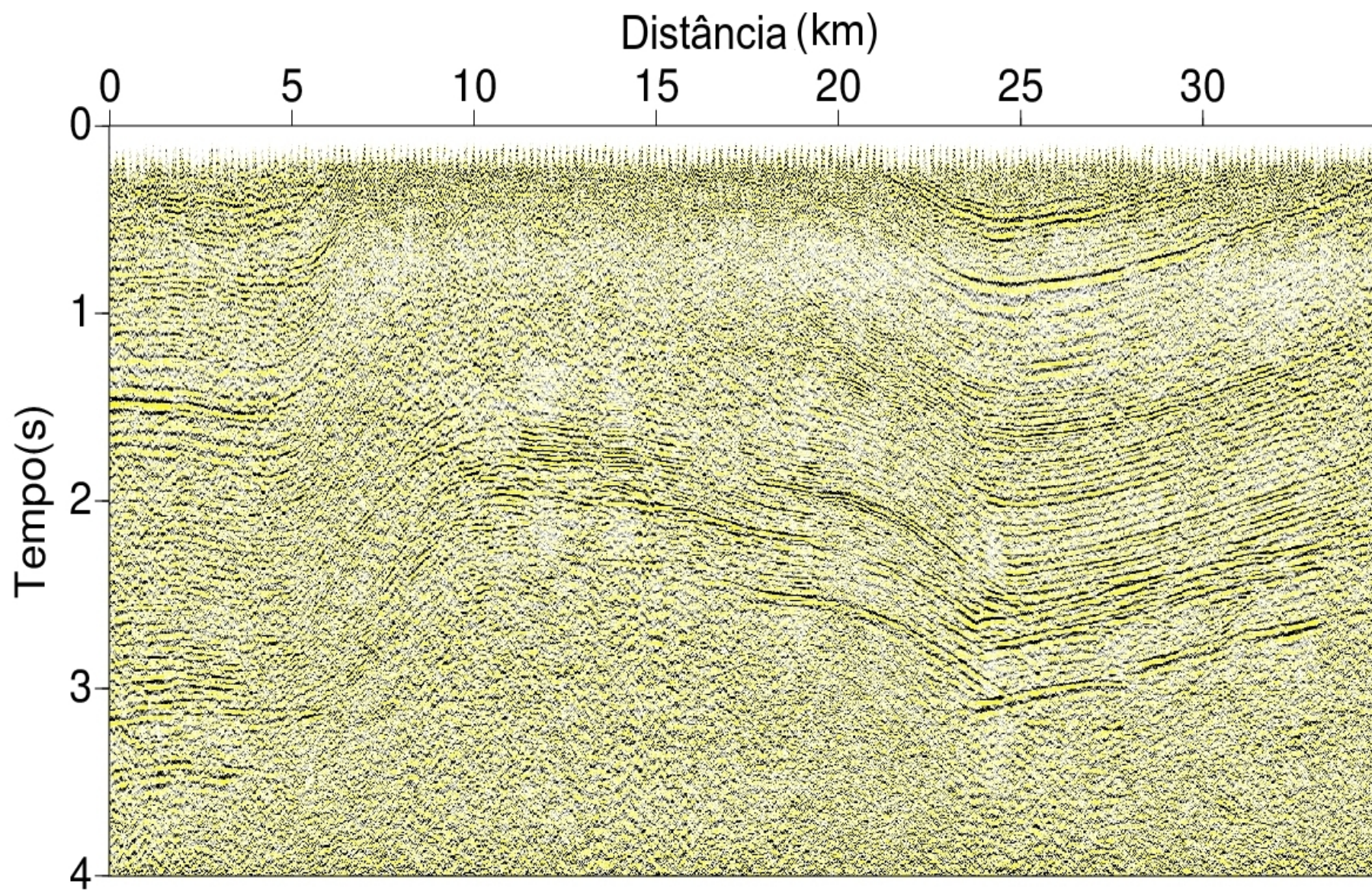


Figura 4.23: Seção empilhada com filtragem $F\text{-}K + \text{SVD}_{df} + \text{DIL}_p$.

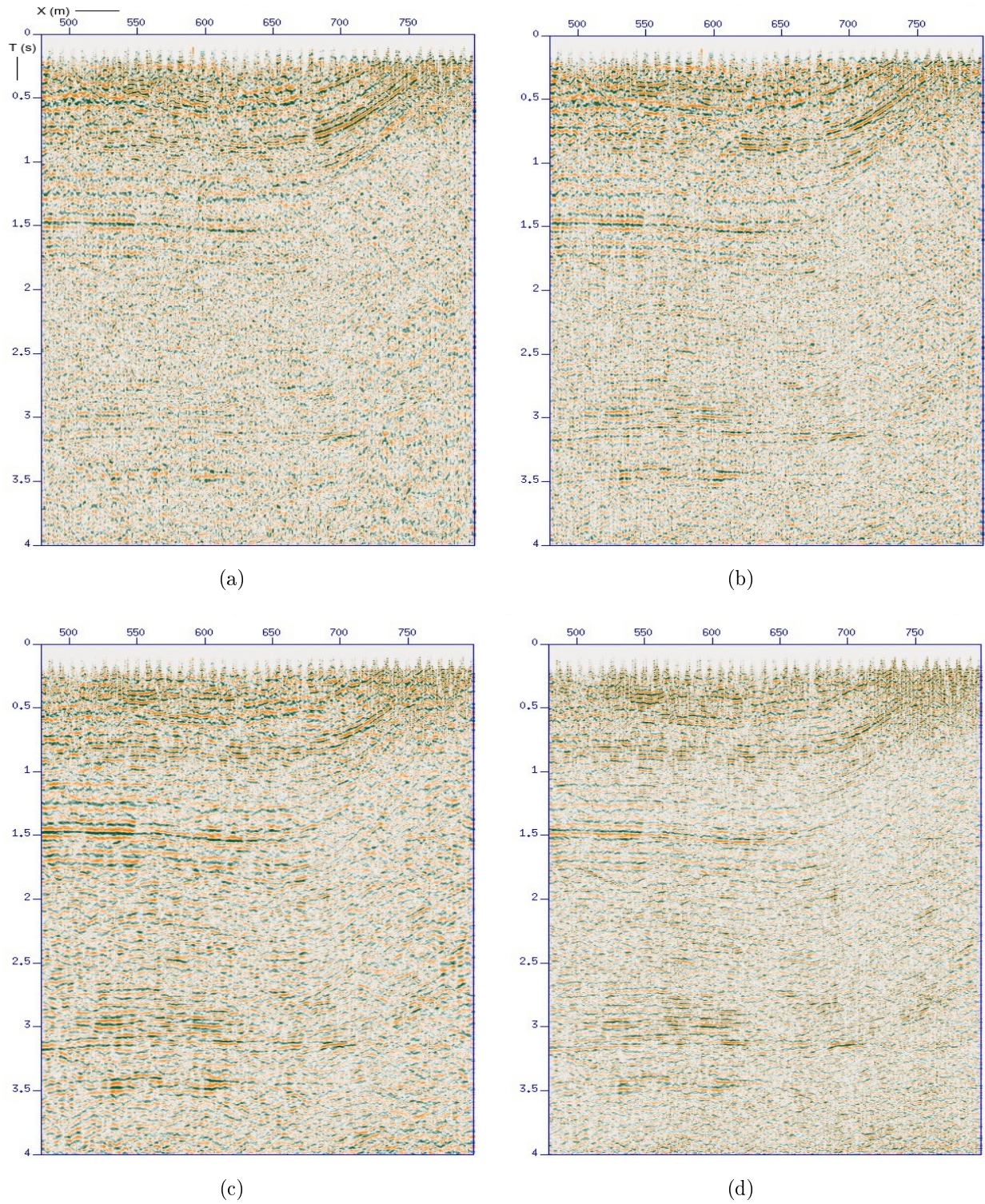


Figura 4.24: Detalhe 1 da seção sísmica: (a) Original; (b) Filtrada com SVD_{df} ; (c) Filtrada com F-K+ SVD_{df} ; (d) Filtrada com F-K+ SVD_{df} + DIL_p .

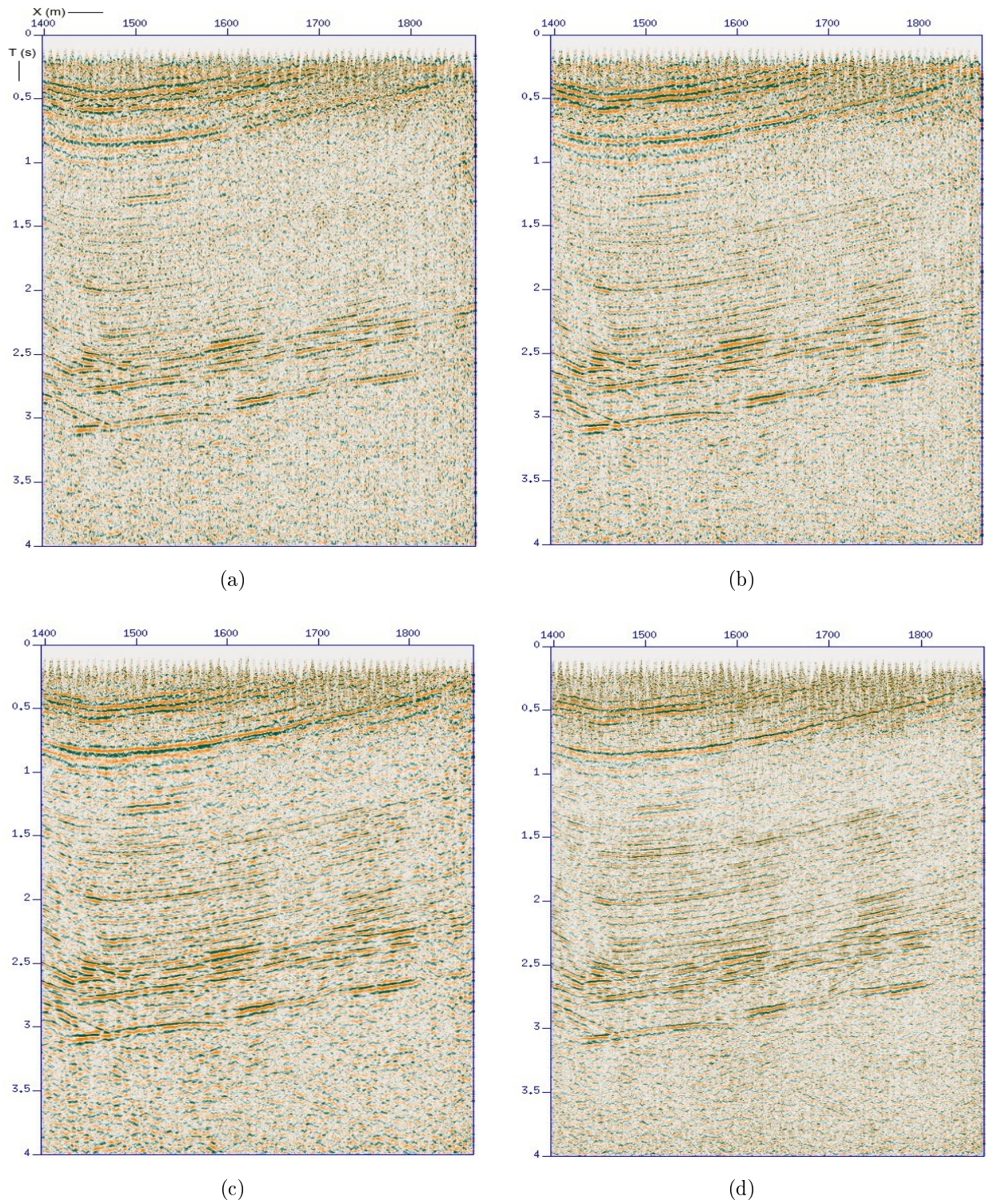


Figura 4.25: Detalhe 2 da seção sísmica: (a) Original; (b) Filtrada com SVD_{df} ; (c) Filtrada com F-K+ SVD_{df} ; (d) Filtrada com F-K+ SVD_{df} + DIL_p .

CAPÍTULO 5

Conclusões

A filtragem de dados sísmicos consiste no emprego correto e equilibrado da atenuação de ruído e preservação de sinal. É através dessa relação que uma filtragem satisfatória poderá ser avaliada, não necessariamente deverá eliminar por completo o ruído, pois tal tarefa é quase impossível e além disso pode descartar informações relevantes para a qualidade do sinal. Do mesmo modo, um filtro muito suave que permita a presença de muita informação desnecessária atrelada aos eventos de interesse pode não ser suficiente para gerar um boa seção sísmica que caracterize com a fidelidade adequada o interior da terra. Ao equilibrar o binômio atenuação/preservação consegue-se a filtragem ideal. Levando essas considerações em conta e tudo o que foi apresentado pode-se dizer que o objetivo proposto no início do trabalho foi alcançado, já que uma filtragem eficiente do *ground roll* foi alcançada.

Os diferentes métodos que foram expostos e aplicados tanto em dados sintéticos quanto em dados reais, atuaram muito bem na atenuação do *ground roll*.

A filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência, mostrou-se prática, pois pode ser facilmente modificada através dos seus parâmetros e ajustada com boa correlação na banda de frequência em que atua o *ground roll*.

O bom desempenho da filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência também pode ser percebido na melhora significativa que causou na análise de velocidade, isso se refletiu diretamente no aumento da qualidade da seção sísmica filtrada, através de refletores mais nítidos, com boa continuidade lateral e em maior número. É um filtro simples de se aplicar e que pode ser facilmente combinado com outros tipos de filtragens, como exemplo no trabalho utilizou-se o filtro F-K, mostrando bons resultados quando atuaram em conjunto.

Os resultados atingidos com a deconvolução de Wiener-Levinson e com a deconvolução iterativa com norma L_p , foram satisfatórios. Através dos dados sintéticos ficou nítida a diferença entre a deconvolução de Wiener-Levinson, quando o pulso não é de fase mínima, e a deconvolução iterativa com norma L_p . Esta última atuou de forma eficiente, mostrando que independe no caráter de fase mínima do pulso sísmico.

Nos dados reais, as respectivas seções sísmicas deconvolvidas apresentaram resultados bem semelhantes, muito embora analisando com mais um pouco de cuidado percebe-se que

a deconvolução iterativa com norma L_p conseguiu comprimir um pouco mais os refletores e delinear mais esses eventos, por isso apresentou resultado melhor. A qualidade da seção sísmica deconvolvida foi consideravelmente elevada quando combinada com os métodos de filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência e a filtragem F-K.

A atenuação do *ground roll* através desses métodos alternativos foi eficiente, contribuiu para o aumento da razão sinal/ruído na seção sísmica filtrada e deconvolvida, a mesma possui qualidade superior e com representatividade maior do meio geológico em subsuperfície quando comparada com a seção sísmica original.

Agradecimentos

- A Deus por me dar força e saúde para os mais diversos e adversos momentos da vida.
- À minha preciosa e maravilhosa mãe, Josineide Reis, por ser um exemplo de mulher vencedora e fazer de mim tudo e um pouco mais do que sou. Sou grata a melhor mãe do mundo, por todo seu amor, carinho e amizade, por acreditar em mim e por todos esforços empenhados para que eu chegasse até aqui. Agradeço também a todos os outros membros da família.
- À minha melhor amiga, Gabriela Andrade, por esses longos anos de amizade, cumplicidade e lealdade. Por estar sempre ao meu lado na comemoração do sucesso e no amparo do fracasso. Agradeço por ter essa pessoa tão incrível, amável e singular em minha vida.
- Ao meu orientador, Milton José Porsani, por todos ensinamentos que muito me ajudaram a alcançar essa importante etapa na vida. E por me dar a primeira oportunidade no curso de Geofísica e sempre me “indicar o caminho das pedras”.
- Ao professor Wilson Mouzer Figueiró, pelos ensinamentos e incentivos e pela participação na banca.
- A Michelângelo Gomes da Silva, por toda sua ajuda ao longo do curso, por ser essa pessoa tão prestativa e pela participação na banca.
- A todos meus professores que durante essa jornada na Universidade e fora dela muito me ensinaram, contribuindo para meu desenvolvimento como pessoa, estudante e profissional. E também aos meus colegas de curso pela boa convivência ao longo do curso.
- Aos funcionários da Universidade, especialmente Ana, Fernanda e Joaquim, por todo auxílio prestado.
- Ao LAGEP pela infraestrutura fornecida para o desenvolvimento do trabalho.
- À ANP-PRH08 pelo incentivo financeiro e em especial ao professor Hédison Kiuity Sato pela coordenação da bolsa de estudos.

Referências Bibliográficas

- Bekara, M. e Van der Baan, M. (2007) Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data, *Geophysics*, **72**(2):V59–V65.
- Freire, S. L. M. (1986) Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos, Tese de Doutorado, Salvador, Brasil.
- Golub, G. H. e Van Loan, C. F. (1996) *Matrix computations* (Johns Hopkins studies in mathematical sciences), The Johns Hopkins University Press.
- Ledesma, D. C. (2011) Deconvolução de dados sísmicos de reflexão utilizando mudança de fase do filtro de Wiener-Levinson, Tese de Doutorado, Salvador, Brasil.
- Levinson, N. (1947) The wiener rms (root mean square) error criterion in filter design and prediction, *J. Mathematical Phys.*, **25**:261–278.
- Lima, R. R. e Porsani, M. J. (2013) Atenuação do *Ground-Roll* utilizando filtragem svd no domínio da frequência, In: *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- Melo, P. E. M. (2002) Deconvolução iterativa do pulso sísmico utilizando norma L_p , Dissert. de Mestrado, Salvador, Brasil.
- Mojica, O. F. (2011) Aplicações da Filtragem SVD na Análise de velocidades e no Empilhamento CMP, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Porsani, M. J. (1986) Desenvolvimento de algoritmos tipo Levinson para o processamento de dados sísmicos, Tese de Doutorado, Salvador, Brasil.
- Porsani, M. J. e Ursin, B. (2000) Mixed-phase deconvolution and wavelet estimation, *The Leading Edge*, **19**(1):76–79.
- Porsani, M. J.; Niwas, S. e Ferreira, N. R. (2001) Robust inversion of vertical electrical sounding data using a multiple reweighted least-squares method, *Geophysical prospecting*, **49**(2):255–264.
- 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.
- Robinson, E. A. e Treitel, S. (1980) *Geophysical signal analysis*, Prentice-Hall New Jersey.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Yilmaz, Ö. (2001) *Seismic data analysis*, Society of Exploration Geophysicists Tulsa.