



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ATENUAÇÃO DE REFLEXÕES MÚLTIPLAS DE
CURTO PERÍODO UTILIZANDO DECONVOLUÇÃO
PREDITIVA ADAPTATIVA

DEIZE ALMEIDA DOS SANTOS

SALVADOR – BAHIA

DEZEMBRO – 2014

**Atenuação de reflexões múltiplas de curto período utilizando deconvolução
preditiva adaptativa**

por

DEIZE ALMEIDA DOS SANTOS

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

_____ Dr. Milton José Porsani - Orientador

_____ Msc. Michelângelo Gomes da Silva

_____ Bsc. Rafael Rodrigues Manenti

Data da aprovação: 19/12/2014

Aos meus pais, que sempre
estiveram ao meu lado durante toda
esta trajetória.

RESUMO

A atenuação de reflexões múltiplas representa um grande desafio ao processamento de dados sísmicos marítimos. Principalmente ao processamento de dados adquiridos sobre lâmina d'água rasa da plataforma continental na qual estão presentes, múltiplas de curto período. Essas reverberações da lâmina d'água chegam tão rápido após o evento primário, que torna a sua remoção e identificação muito difíceis. A presença de múltiplas na seção sísmica pode ser confundida com estruturas em subsuperfície ou mascarar reflexões primárias, causando dificuldades durante o processo de interpretação e prejudicando a confiabilidade dos dados.

O método de filtragem conhecido como deconvolução preditiva de Wiener-Levinson (WL) visa a predição e remoção de eventos periódicos, tais como as reflexões múltiplas. Este método permite melhorar a resolução temporal dos dados sísmicos e atenuação de múltiplas, é um método estatístico que remove a coerência temporal dos traços sísmicos. Os filtros preditivos utilizados no método de WL são obtidos com o método dos mínimos quadrados e utilizam a premissa de que o pulso sísmico é estacionário, e isso não ocorre com dados sísmicos reais. Para contornar este problema o método WL é normalmente aplicado utilizando-se janelas de tempo fixas, distribuídas ao longo do tempo de registro. Além dessa premissa o método WL usa a hipótese de que os dados sísmicos possuem valores de amplitude nula fora da janela, desta forma acaba prejudicando o resultado da deconvolução preditiva, portanto tornando-o menos eficaz a remoção das múltiplas.

No presente trabalho, empregou-se uma adaptação do método de deconvolução preditiva utilizando o algoritmo de Morf modificado, desenvolvido por Porsani(1986). Este método é apropriado, pois não considera as amplitudes do traço sísmico fora da janela de tempo determinada. Aplicando-se a partir de janelas deslizantes, o algoritmo calcula um novo filtro a cada posição da janela deslizante sem perder a precisão da predição. Para teste da nova abordagem foram utilizados dados sintéticos produzidos, utilizando-se pacotes do SU-CWP e dados sísmicos reais da Bacia de Jequitinhonha cedidos pela PETROBRAS. Os resultados obtidos com a nova abordagem demonstram que a deconvolução preditiva adaptativa atua com eficiência na atenuação de múltiplas de curto período, comparado ao método WL com janelas de tempo fixa tanto em dados sintéticos quanto no dado real.

Palavras-chave: *Múltiplas de curto período. Deconvolução preditiva de Wiener-Levinson. Deconvolução preditiva de Morf modificada.*

ABSTRACT

The attenuation of multiple reflections is a challenge to the processing of marine seismic data. Mainly on the processing of shallow water data, where the short period multiples are present. These reverberations of water depth arrive so quickly after the primary event, making their removal and identification more difficult. The presence of multiples on seismic section can be confused with subsurface structures or mask primary reflections causing difficulties during the interpretation process and jeopardizing the reliability of the data.

The filtering method known as Wiener-Levinson (WL)'s predictive deconvolution aims predicting and removing periodic events, such as multiple reflections. This method improves the temporal resolution of seismic data and attenuation of multiples, is a statistical method that removes the temporal coherence of the seismic traces. The predictive filters used in the WL method are obtained with the method of least squares and using the assumption that the seismic pulse is steady, and that does not occur with real seismic data. To circumvent this problem the WL method is usually applied using fixed time windows, distributed over time registration. Beyond this premise WL method uses the assumption that the seismic data amplitude values are zero outside the window, thus impairing the result ends of predictive deconvolution, therefore less effective removal of multiples.

In the present study, we used an adaptation of the predictive deconvolution method using the modified Morf algorithm, developed by Porsani (1986). This method is appropriate as it does not consider the amplitudes of the seismic trace outside the given time window. Applying from sliding windows, the algorithm computes a new filter every position of the sliding window without losing the accuracy of the prediction, justified by removing the multiples. Synthetic data generated were used to test the new approach, using SU-CWP packages and real seismic data from Bacia de Jequitinhonha ceded by PETROBRAS. The results obtained show that new approach to adaptive predictive deconvolution effectively acts to attenuate short path multiples, compared with WL method with fixed time windows both in synthetic data as real data.

Key-words: *Short path multiples. Wiener-Levinson (WL)'s predictive deconvolution. Morf's modified predictive deconvolution.*

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Princípios teóricos	3
1.1 Reflexões sísmicas	4
1.2 O Modelo Convolutacional do Traço Sísmico	6
CAPÍTULO 2 O Método da Deconvolução Preditiva	10
2.1 Deconvolução Preditiva de Wiener-Levinson	10
2.2 Deconvolução de Morf para predição arbitrária	12
2.3 Deconvolução preditiva adaptativa Morf modificado	13
CAPÍTULO 3 Metodologia	16
3.1 Processamento convencional do dado sísmico	16
3.2 Geometria	16
3.3 Edição e mute de traços ruidosos	17
3.4 Filtragem Passa-Banda	18
3.5 Aplicação de Ganhos	19
3.6 Análise de Velocidade e correção de NMO	19
3.7 Empilhamento CMP	20
3.8 Migração	20
3.9 Aplicação da deconvolução preditiva Wiener-Levinson com janelas de tempo fixas	21
3.10 Aplicação da Deconvolução Preditiva Adaptativa em dado sintético	22
3.11 Aplicação do Método de Deconvolução Preditiva Adaptativa em dado real	23

CAPÍTULO 4	Resultados	26
4.1	Aplicação do Método de Deconvolução Preditiva de WL com janelas fixas no tempo	26
4.2	Resultados da deconvolução preditiva adaptativa	28
CAPÍTULO 5	Etapas finais do processamento	30
5.1	Fluxograma final	41
CAPÍTULO 6	Conclusões	42
Agradecimentos		43
APÊNDICE A	Recursao de Levinson monocanal de predição arbitrária	
	$L > 1$	44
APÊNDICE B	Programa em FORTRAN	47
Referências Bibliográficas		61

ÍNDICE DE TABELAS

1.1	Valores típicos do coeficiente de reflexão entre vários meios.	6
3.1	Parâmetros de aquisição da linha sísmica 214 – 0266.	17
3.2	Parâmetros utilizados na deconvolução de WL com janelas fixas.	22

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Modelo representando a aquisição sísmica. Adaptada de [Gerhardt, 1998] (Silva, 2004).	3
1.2	Raios refletidos e transmitido associados a um raio normalmente incidente sobre uma interface de contraste de impedância acústica (Brooks, 2009). . .	5
1.3	Modelo de reverberação da energia sísmica.	6
1.4	Modelo convolucional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (Brooks, 2009).	7
2.1	Variação dos períodos ao longo do traço sísmico.	15
3.1	Filtro trapezoidal passa-banda e as respectivas frequências utilizadas.	18
3.2	Fluxograma das etapas do pré-processamento.	19
3.3	Janelas em tempo, $J_f(i)$, utilizadas para fazer a deconvolução no ProMax. . .	21
3.4	(a) Sismograma original. (b) Resultado após a deconvolução preditiva adaptativa.	23
3.5	Atualização dos parâmetros para deconvolução preditiva dentro de um mesmo traço. Chartuni (2010).	24
3.6	Tiros selecionados para deconvolução preditiva adaptativa.	25
4.1	CDP 298 (a) original (b) após a deconvolução preditiva WL com janelas fixas no tempo.	27
4.2	CDP 298 (a) original (b) após a deconvolução preditiva adaptativa.	29
5.1	Fluxograma do processamento usado para obtenção da seção sísmica empilhada preliminar.	30
5.2	Espectro de velocidade preliminar.	33
5.3	Seção empilhada preliminar.	34
5.4	Análise de velocidade final.	35
5.5	Seção empilhada após a deconvolução preditiva de WL com janelas fixas. . .	36
5.6	Seção empilhada após a deconvolução preditiva adaptativa de Morf.	37
5.7	(a) Área ampliada da seção empilhada após a deconvolução preditiva de WL e (b) após deconvolução adaptativa de Morf.	38
5.8	(a) Comparação dos resultados em uma área ampliada em da seção empilhada após deconvolução preditiva de WL e (b) após deconvolução adaptativa de Morf.	38

5.9	Seção migrada após deconvolução adaptativa de WL.	39
5.10	Seção migrada após deconvolução adaptativa de Morf.	40
5.11	Fluxograma final do processamento adotado no trabalho.	41

INTRODUÇÃO

A sismica atualmente é o método geofísico mais utilizado pela indústria do petróleo, e esta fornece imagens da subsuperfície baseado em contrastes de propriedades acústicas das camadas litológicas. Sendo a sismica de reflexão a técnica mais empregada nas aquisições sísmicas de campo, tendo como princípio a propagação de ondas mecânicas para a obtenção de refletores sísmicos. E para a obtenção de uma seção sísmica de boa qualidade e que represente as estruturas geológicas em subsuperfície, é importante aumentar a razão sinal/ruído. As reflexões múltiplas presentes nos dados sísmicos, são classificadas como ruídos coerentes e são altamente prejudiciais na qualidade dos dados sísmicos, pois podem ser interpretadas como reflexões primárias ou sobrepor a estes, dificultando sua identificação. Em relação ao tempo de trânsito as reflexões múltiplas podem ser classificadas como curto, médio e longo período.

Os eventos múltiplos de curto período não apresentam periodicidade bem definida e também no sismograma apresentam-se sobrepostos aos eventos primários (Vershuur, 2006). Sendo assim, as reflexões múltiplas de curto período são mais difíceis de serem preditas e assim suprimidas, representando um grande problema no processamento sísmico. Estas múltiplas de curto período estão associadas às camadas pouco espessas, ao contrário das múltiplas de longo período, que são eventos distintos das reflexões primárias que lhes deram origem. As múltiplas de longo período são eventos onde há um grande intervalo de repetição. Sendo que as reflexões múltiplas de longo período podem ser separadas das primárias que as geraram. Já as múltiplas de médio período são reflexões que possuem uma periodicidade intermediária em relação às duas anteriores.

Existem inúmeros métodos para a atenuação de múltiplas, de maneira geral podem ser agrupados em quatro categorias: (1) métodos baseados na discriminação da velocidade aparente (Schneider, Prince and Giles, 1965), (2) métodos baseados na equação da onda (Berryhill and Kim, 1986), métodos baseados na periodicidade (Backus, 1959; Peacock and Treitel, 1969), e (4) métodos baseados na coerência (Doicin and Spitz, 1991).

No presente trabalho foi utilizado o método de deconvolução preditiva adaptativa para a atenuação de reflexões múltiplas, principalmente múltiplas de curto período. Este método é baseado no caráter periódico das múltiplas.

A deconvolução preditiva para a atenuação das múltiplas é um método estatístico que se baseia na periodicidade das múltiplas, sendo que os filtros preditivos são obtidos com o método dos mínimos quadrados e implicitamente utilizam a premissa usual de que os

dados sísmicos possuem valores de amplitude nula fora da janela de tempo considerada. Desta forma os filtros de Wiener-Levinson perdem eficácia na predição do evento periódico prejudicando o resultado final da atenuação da múltipla. Entretanto, essa periodicidade só é preservada em afastamentos curtos e meios horizontalmente estratificados. Para resolver o problema da falta de estacionariedade do processo, alguns autores (Clarke, 1968; Griffiths et al., 1977; Wang, 1969) desenvolveram a deconvolução adaptativa, onde, em condições de não estacionariedade do pulso sísmico o traço é dividido em janelas e em cada janela é aplicado um filtro específico.

A premissa de que os dados possuem valores de amplitude fora da janela de tempo considerada, não é atendida. Assim, Morf et al. (1977) desenvolveram um algoritmo para solução das ENs associadas ao problema de predição linear unitária em que não é feita nenhuma hipótese sobre as amplitudes fora da janela especificada. Nesse contexto a matriz das ENs perde a estrutura Toeplitz e o filtro obtido com algoritmo de Morf depende somente das amostras que estão no interior da janela e assim, consegue ser mais eficiente do que o método convencional de Wiener-Levinson. Porsani(1986) estendeu o algoritmo de Morf de predição unitária para predição arbitrárias, possibilitando seu emprego na deconvolução preditiva.

O trabalho está organizado da seguinte maneira. O capítulo 1 apresenta os conceitos teóricos importantes para o entendimento de reflexões sísmicas e o modelo convolucional do traço sísmico. No capítulo 2 é apresentada a metodologia que foi empregada no processamento da linha sísmica 214-0266 da Bacia do Jequitinhonha. No capítulo 3 são apresentados os resultados das deconvoluções utilizadas. No capítulo 4 têm-se os resultados das deconvoluções. No capítulo 5 estão presentes as etapas finais do processamento, as seções empilhadas e migradas. As conclusões e sugestões do trabalho estão no capítulo 5.

CAPÍTULO 1

Princípios teóricos

O método sísmico tem como objetivo principal a formação de modelos de dados que, depois de processados e organizados, retenham informações relevantes a respeito da geologia da região onde foram adquiridos. Dentre as técnicas existentes, a sísmica de reflexão classificada como um método indireto de exploração da subsuperfície possui várias vantagens tais como sua capacidade de produzir como resultado final, imagens sísmicas que forneçam alta definição das feições geológicas, além de permitir a cobertura de grandes áreas de aquisição quando comparado com um método de aquisição direto, como a perfuração de poços. A sísmica de reflexão utiliza a propagação de ondas mecânicas para a obtenção de refletores sísmicos. Esta técnica do método sísmico consiste, basicamente, em gerar ondas sísmicas artificiais através de uma fonte sísmica e registrar as reflexões provenientes das diversas interfaces em subsuperfícies em transdutores sísmicos (geofones ou hidrofones). A onda gerada propaga-se em subsuperfície, sendo parcialmente refletida ao encontrar interfaces entre camadas que apresentem contraste significativo de propriedades elásticas. Os tempos de chegada de cada reflexão são relacionados às velocidades de propagação da onda sísmica em cada camada e, em primeira aproximação, a amplitude registrada está relacionada ao contraste de impedância.

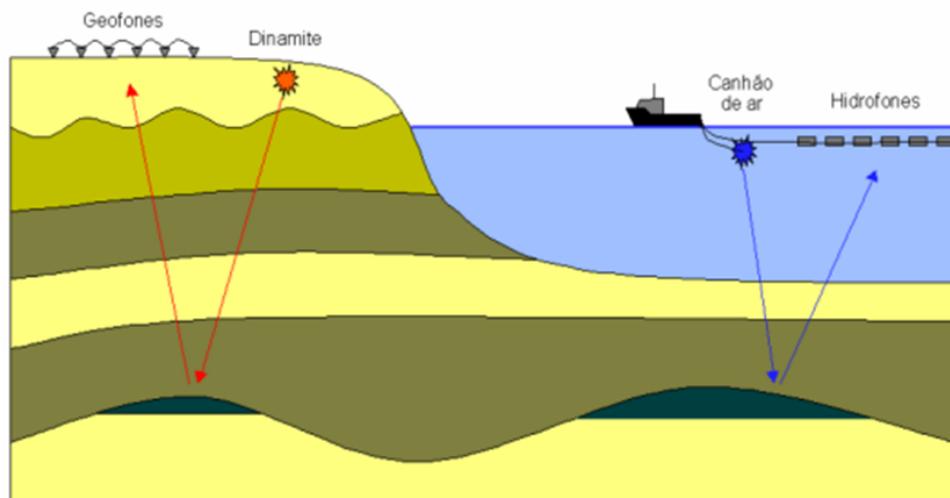


Figura 1.1: Modelo representando a aquisição sísmica. Adaptada de [Gerhardt, 1998] (Silva, 2004).

1.1 Reflexões sísmicas

A subsuperfície é geralmente composta por unidades rochosas diferentes e, conseqüentemente, propriedades físicas distintas e para uma boa compreensão do processo de deconvolução que será visto no capítulo 2, 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 (ρ) do meio, e representa a dificuldade com que tal onda reverbera no mesmo. A expressão matemática da impedância acústica é dada por:

$$I = \rho v \quad (1.1)$$

A onda sísmica propagando-se em um meio composto por duas camadas de diferentes impedâncias acústicas, ao incidir na interface que separa essas camadas, parte da energia da onda é refletida e outra parte é transmitida, como demonstrado na Figura 1.2. Para uma incidência normal em camadas planas e paralelas de velocidade constante, a equação que governa a reflexão é dada por:

$$R = \left(\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right), \quad (1.2)$$

onde,

- R represente o coeficiente de reflexão para ondas planas;
- I_1 representa a impedância acústica da camada 1;
- I_2 representa a impedância acústica da camada 2.

O coeficiente de reflexão (R) é uma medida numérica do efeito de uma interface sobre a propagação de onda, ou seja, ele é um parâmetro que indica o contraste entre as impedâncias acústicas das rochas e, portanto, o quanto de energia da onda sísmica é refletida ao incidir sobre a interface. Assim, quanto maior for o contraste de impedância acústica entre as camadas geológicas, maior será a intensidade de reflexão.

Os raios que retornam à superfície após refletir em uma interface são as reflexões primárias. A expressão matemática do tempo de chegada de uma reflexão primária associada ao fundo do mar, a partir do conceito de CMP (Mayne, 1962), é dada por:

$$T_{prim} = \sqrt{\left(\frac{(2H)^2 + X^2}{V^2} \right)}, \quad (1.3)$$

onde,

- H é a profundidade no ponto médio;

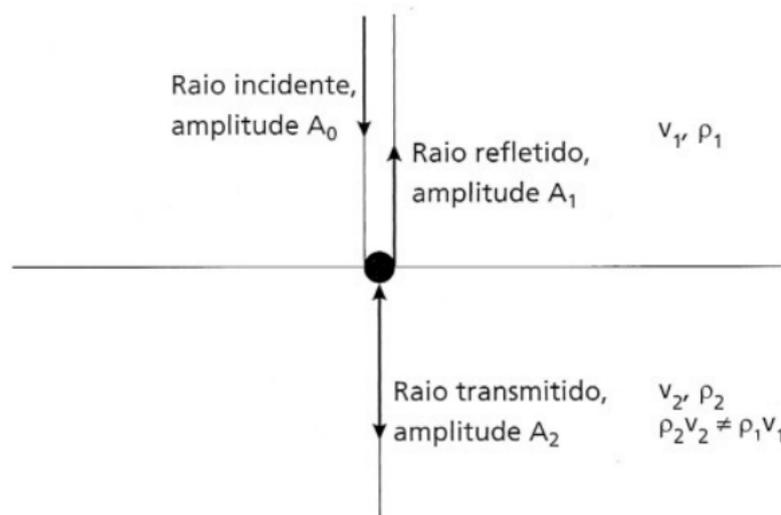


Figura 1.2: Raios refletidos e transmitido associados a um raio normalmente incidente sobre uma interface de contraste de impedância acústica (Brooks, 2009).

- X o afastamento fonte-receptor;
- V a velocidade de propagação da onda no meio.

Reflexões múltiplas são eventos gerados quando a onda é refletida várias vezes antes de chegar ao receptor. Na aquisição sísmica marinha, a lâmina d'água, é delimitada por duas interfaces, a interface superior (ar-água) e a interface inferior (água-sedimentos). Nestas duas interfaces, o contraste de impedância será bastante significativo. Assim, para a incidência normal o coeficiente de reflexão R apresentará altos valores. Principalmente na interface ar-água, cujo coeficiente de reflexão possui um valor próximo a -1 , dando características a essa interface de um refletor perfeito.

Nos levantamentos sísmicos de reflexão tem-se a existência de reverberações da energia sísmica, gerando as reflexões múltiplas associadas à superfície da lâmina d'água. Além das múltiplas associadas à lâmina d'água, vale ressaltar que em subsuperfície, camadas geológicas com interfaces limítrofes que apresentam fortes contrastes de impedância acústica, também favorecerá a geração de reflexões múltiplas em dados sísmicos marinhos.

As reflexões múltiplas geralmente tendem a ter amplitudes mais baixas que as reflexões primárias, por causa da perda de energia a cada reflexão. Todavia, há tipos de múltiplas que são refletidas por interfaces de alto coeficiente de reflexão e, portanto, tendem a ter amplitudes comparáveis às das reflexões primárias. Em relação ao tempo de trânsito, as reflexões múltiplas podem ser classificadas como: múltiplas de curto período; e múltiplas de longo período. As múltiplas de curto período são eventos superpostos aos eventos primários que lhes deram origem e estão associadas às camadas pouco espessas, ao contrário das múltiplas

TIPOS DE INTERFACE	COEFICIENTE DE REFLEXÃO - R
Água - Ar	-1
Água - Lodo	0,05 - 0,1
Água - Argila/Silte	0,1 - 0,2
Água - Areia	0,3 - 0,4
Água - Calcário	0,5
Lodo - Argila/Silte	0,1
Argila - Areia	0,1
Areia - Calcário	0,2
Argila - Calcário	0,3
Areia - Granito	0,4

Tabela 1.1: Valores típicos do coeficiente de reflexão entre vários meios.

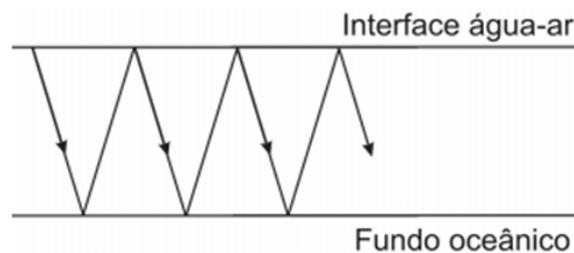


Figura 1.3: Modelo de reverberação da energia sísmica.

de longo período, que são eventos distintos das reflexões primárias que lhes deram origem. A expressão análoga generalizada à Equação (1.3) obtendo-se desse modo à equação para o tempo de registro da múltipla de ordem n é dado por:

$$T_{mult}(n) = \sqrt{\left(\frac{\{2(n+1)H\}^2 + X^2}{V^2}\right)} \quad (1.4)$$

1.2 O Modelo Convolutional do Traço Sísmico

O traço sísmico é composto por uma superposição de assinaturas da fonte e pode ser representado por um modelo matemático chamado de modelo convolutional, que pode ser descrito por:

$$x_t = p_t * e_t + n_t, \quad (1.5)$$

onde,

- x_t representa o traço sísmico;
- p_t representa o pulso sísmico emitido pela fonte;
- e_t , também chamada de função refletividade, representa a resposta impulsiva da terra excluindo as múltiplas associadas com o fundo do mar;
- n_t representa o ruído superimposto ao sinal;
- $*$ representa a operação de convolução.

Sendo o ruído desprezível e adicionando a múltipla na equação, tem-se:

$$x_t = p_t * e_t * m_t. \quad (1.6)$$

onde,

- m_t representa o trem de onda da reverberação da camada de água (Yilmaz, 1987).

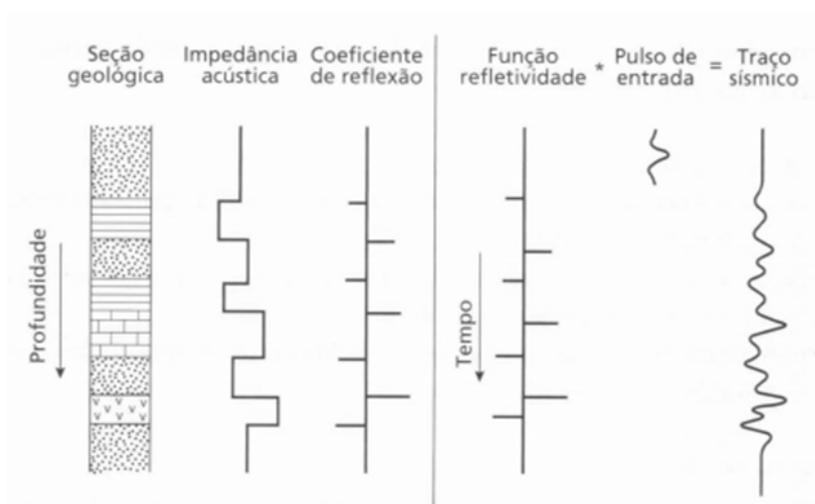


Figura 1.4: Modelo convolucional do traço sísmico construído a partir de um padrão de camadas planas e paralelas com diferentes contrastes de impedância (Brooks, 2009).

A função refletividade e_t 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. O método de deconvolução que será visto no Capítulo 2, tem por objetivo recuperar a função refletividade, aumentando assim a resolução temporal dos dados e facilitando o reconhecimento das litologias estudadas. Para isso é preciso primeiramente fazer algumas considerações (Yilmaz, 1987) as quais, são atendidas de forma aproximadas e mesmo assim, o modelo convolutivo se mostra muito eficiente para a representação do traço sísmico:

- A Terra é constituída por camadas horizontais com velocidade constante. (Esta premissa mostra-se falha, pois a Terra é constituída de regiões geologicamente complexas ou anisotrópicas);
- A fonte sísmica gera uma onda compressional plana cuja incidência nas camadas é normal. (Esta premissa pressupõe que a aquisição seja feita em *offset-zero*, o que na prática não é possível. Todavia, é possível fazer uma aproximação desde que as camadas estejam a uma profundidade considerável em relação ao cabo de receptores, assim assume-se que o ângulo de incidência seja pequeno e por isso pode-se desprezar a dependência do ângulo por parte dos coeficientes de reflexão);
- A forma do pulso sísmico não se altera com a sua propagação em subsuperfície, ou seja, ele é estacionário. Não se considera o decaimento da amplitude e a atenuação das altas frequências. (O que realmente não acontece, pois ao propagar-se em subsuperfície, o pulso sísmico sofre distorções devido aos efeitos de propagação e adição de ruídos. Por exemplo, o pulso sísmico tende a alongar-se devido ao efeito de absorção);
- O ruído é nulo. (Esta premissa é aceitável, considerando o traço sísmico com elevada razão sinal/ruído);
- O pulso sísmico p_t é conhecido. (Esta premissa é a que apresenta mais problemas pois se conhecido p_t e x_t bastaria calcular e_t . Como não é isso que acontece é necessário fazer uma estimativa de p_t).

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 e_t .

$$h_t * x_t = h_t * p_t * e_t = \delta_t * e_t = e_t \quad (1.7)$$

onde,

$$\delta_t = \begin{cases} 0, & \text{se } t \neq 0 \\ 1, & \text{se } t = 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

Conhecendo o pulso, é possível resolver o sistema de $N+1$ equações com base no método de mínimos quadrados (Berkhout, 1977) e encontrar o filtro ótimo que deconvolve o traço a partir das equações normais (1.9).

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_{-1} & \dots & r_{-N} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{-1} \\ r_N & \dots & r_1 & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Sendo que r_k representa o k -ésimo coeficiente da função de autocorrelação (FAC) do pulso é dado por:

$$r_k = \sum_t p_t p_{t+k} \quad (1.10)$$

A matriz representada em (1.9) é denominada matriz de autocorrelação banda estruturada Toeplitz. Ela é simétrica em 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 coeficientes um percentual baixo do coeficiente r_0 , esse recurso é denominado *luz branca* (0,1). Quando o pulso não é conhecido, 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 caráter estatístico e se faz necessário a utilização de mais duas premissas (Robinson e Treitel, 2000):

- A refletividade é aleatória;
- O pulso sísmico é de fase mínima.

A partir do que foi apresentado tem-se que, no domínio do tempo e de forma ideal, o traço sísmico resulta da interação de uma onda compressional, estacionária, de incidência normal com as interfaces em subsuperfície. A partir dessa interação, gera-se uma onda refletida e outra transmitida, a qual vai continuar a propagar-se para baixo em subsuperfície. As ondas geradas terão a mesma forma que a onda incidente, mas com amplitudes relativas diferentes conforme o coeficiente de reflexão.

CAPÍTULO 2

O Método da Deconvolução Preditiva

O método de deconvolução é aplicado na compressão do traço sísmico que geralmente visa obter um aumento na resolução temporal do traço, ou seja, enfatizando os refletores, e na atenuação ou supressão de múltiplas causadas pelas reverberações, no caso de levantamentos marinhos, da energia sísmica na base e no topo da lamina d'água que são as múltiplas de curto período, ou causadas por eventos de longo período. Um filtro preditivo prediz eventos periódicos, como múltiplas no sismograma, permitindo que a componente estimada seja removida do traço sísmico.

A deconvolução preditiva pode ser usada para estimar o pulso sísmico, p_t , ou prever e suprimir esta componente periódica no sismograma, isto é, prever as múltiplas, m_t . O primeiro objetivo é obtido usando um operador com distancia de predição unitária, (Robinson, 1957; Treitel e Lines, 1982; Yalmaz, 1987), no qual, utilizando $L = 1$, o pulso é comprimido para uma função delta de Dirac, pois ocorrerá a deconvolução ao impulso e o traço resultante representará idealmente a resposta impulsiva da Terra. Enquanto que para prever e suprimir as múltiplas é necessário que L seja maior que a unidade. O operador preditivo de erro terá sua ação deslocada no tempo sobre amostras situadas em tempos avançados, o que nos permite escolher convenientemente o valor de L , de forma a um operador que atue na zona de múltiplas, de modo a atenuá-las (Robinson e Treitel, 1980).

2.1 Deconvolução Preditiva de Wiener-Levinson

O método de deconvolução preditiva de Wiener-Levinson possui três etapas: o cálculo dos coeficientes da função de autocorrelação (FAC), a resolução de equações normais (ENs) para obtenção do filtro preditivo WL e a aplicação do filtro por meio da convolução obtendo-se o traço deconvolvido como sendo o resíduo entre o traço original (sinal de entrada) e o traço predito.

A filtragem preditiva monocanal é descrita pela expressão de convolução discreta e é representada na forma de predição linear (Robinson e Treitel, 1980) da seguinte forma,

$$\tilde{x}_{t+L} = \sum_{k=1}^n x_{t-k+1} \tilde{h}_k, \quad (2.1)$$

onde,

- \tilde{x}_{t+L} representa o sinal predito no tempo $t + L$, a partir da combinação linear dos valores de x_t, \dots, x_{t-n+1} ;
- L representa a distância de predição;
- \tilde{h}_k é o filtro de predição.

O erro de predição é definido como sendo a diferença entre a amostra lida e a predita. O erro de predição em uma amostra no tempo $t + L$ é dado por:

$$e_{t+L} = x_{t+L} - \tilde{x}_{t+L} \quad (2.2)$$

A Equação (2.2) pode ser representada em termos da Equação (2.1) como:

$$e_{t+L} = x_{t+L} - \sum_{k=1}^n x_{t-k+1} \tilde{h}_k \quad (2.3)$$

O operador de erro com distância de predição L é representado da seguinte forma,

$$1, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{L-1 \text{ zeros}}, -\tilde{h}_1, -\tilde{h}_1, -\tilde{h}_3, \dots, -\tilde{h}_n \quad (2.4)$$

Sendo que os n coeficientes não nulos do filtro atuarão sob o traço sísmico x_t , a tempos passados, preservando as L amostras relacionadas às reflexões primárias.

Escrevendo na forma matricial, para $L = 3$ e $n = 3$, é possível escrever,

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ \vdots \\ e_{t+3} \\ \vdots \\ e_m \\ e_{m+1} \\ e_{m+2} \\ e_{m+3} \\ e_{m+4} \\ e_{m+5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_3 & x_2 & x_1 & x_0 & 0 & 0 \\ x_4 & x_3 & x_2 & x_1 & x_0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{t+3} & x_{t+2} & x_{t+1} & x_t & x_{t-1} & x_{t-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & x_{m-3} & x_{m-4} & x_{m-5} \\ 0 & x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & x_{m-3} & x_{m-4} \\ 0 & 0 & x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & x_{m-3} \\ 0 & 0 & 0 & x_m & x_{m-1} & x_{m-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & x_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -\tilde{h}_1 \\ -\tilde{h}_2 \\ -\tilde{h}_3 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Pode-se observar na matriz (2.5) que $e_j = x_j$, para $j = 0, 1, 2$, assim, as L amostras do traço que se referem as primárias são preservadas. A forma quadrática que corresponde ao vetor de erro de predição é dado por:

$$Q = \sum_t e_t^2 \quad (2.6)$$

Os coeficientes do operador de erro (OPE) devem ser calculados de maneira que o erro quadrático seja mínimo. Minimizando o erro quadrático e colocando na forma expandida das Equações Normais (ENs), tem-se:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_1 \\ r_{n-1} & \cdots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{h}_1 \\ -\tilde{h}_2 \\ \vdots \\ -\tilde{h}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_L \\ r_L + 1 \\ \vdots \\ r_{L-n-1} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A matriz (2.7) possui bandeamentos em relação à diagonal principal e é conhecida como matriz de autocorrelação banda-estruturada Toeplitz cujos coeficientes representam uma estimativa da autocorrelação do pulso sísmico.

O método de deconvolução convencional WL estima o filtro inverso com base no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) que resulta no sistema de ENs mostrado em (2.7). Para um filtro de N coeficientes, este sistema pode ser resolvido através da Recursão de Levinson (RL). Este método pressupõe que o pulso sísmico seja de fase mínima, uma vez que o filtro inverso obtido como solução das ENs é sempre de fase mínima, logo, sua utilização em dados reais nem sempre satisfazem as premissas implícitas no método.

$$\min \{Q\} = E_{h,n} = r_0 - \sum_{k=1}^n r_{L+k} \tilde{h}_k \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_L & r_{L+1} & \cdots & r_{L+n-1} \\ r_L & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-1} \\ r_{L+1} & r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & r_1 \\ r_{L+n-1} & r_{n-1} & \cdots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{h}_1 \\ \vdots \\ \tilde{h}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{h,n} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

O apêndice A apresenta a RL para a obtenção do filtro de predição arbitrária $L > 1$.

2.2 Deconvolução de Morf para predição arbitrária

Durante o processo de deconvolução preditiva de Wiener-Levinson, as amostras dos traços sísmicos são especificados com amplitudes nulas fora do intervalo considerado, os operadores

preditivos obtidos por meio da solução das ENs são responsáveis por erros transientes que são tanto maiores quanto menor for o comprimento da janela considerada (Bunch e White, 1985). Para resolver este problema, Morf et al. (1977) desenvolveram um algoritmo eficiente tipo Levinson para solução das ENs relacionadas ao problema da predição linear unitária, em que não é feita qualquer hipótese sobre os dados da janela considerada. Dessa forma a matriz das ENs perde a estrutura Toeplitz e o filtro obtido com o algoritmo Morf depende apenas das amplitudes das amostras contidas no interior da janela e assim, consegue ter uma maior eficiência na predição.

$$\begin{bmatrix} e_{a,n} \\ \vdots \\ e_{a,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n & x_{n-1} & x_{n-2} & \cdots & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & \cdots & x_{m-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} e_{h,n+L-1} \\ \vdots \\ e_{h,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{n+L-1} & x_{n-1} & x_{n-2} & \cdots & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_{m-L} & x_{m-L-1} & \cdots & x_{m-n-L+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ h_{n,1} \\ h_{n,2} \\ \vdots \\ h_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} e_{h,j} \\ \vdots \\ e_{h,m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_j & x_j & x_{j-1} & \cdots & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m-1} & x_{m-1} & x_{m-2} & \cdots & x_{m-j-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ h_{j+1,1} \\ h_{j+1,2} \\ \vdots \\ h_{j+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$C_{h,j+1} \begin{bmatrix} 1 \\ h_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j+1_{c_{h,0}} & c_{xy,j+1}^T \\ c_{xy,j+1} & C_{b,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ h_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{H,j+1} \\ O_{j+1} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$${}^j x_t = (x_t, \dots, x_{t-j})^T \quad (2.14)$$

2.3 Deconvolução preditiva adaptativa Morf modificado

A essência do processo de deconvolução preditiva na forma adaptativa é o uso de janelas de tempo deslizantes, as quais tenham o tamanho e posição no traço sísmico atualizados, bem como o número de coeficientes do filtro e a distância de predição. A aplicação da deconvolução preditiva parte da premissa de que ao longo do traço sísmico os eventos que

se deseja atenuar ocorrem a certa distância P ou valores múltiplos de P . Caso P varie ao longo do tempo, ou seja, diferente para cada traço sísmico, um novo filtro deve ser calculado para tornar possível a predição e atenuação do referido evento.

Com base nas equações de tempo de chegada da reflexão primária e da múltipla de ordem n , observa-se que o gráfico (Figura 2.1) do tempo de chegada dos eventos primários e múltiplos associados ao fundo oceânico em função da ordem de tais eventos de reflexão é uma reta. Neste caso, é possível atualizar os valores dos períodos ao longo do traço a ser deconvolvido. Os valores do número de coeficientes do filtro e da distância de predição são dados por uma porcentagem do período analisado.

Um parâmetro que é necessário para o cálculo do filtro preditivo é o comprimento da janela. O comprimento não pode ser grande para não entrar na zona das outras múltiplas e nem muito pequeno para não gerar um sistema sub-determinado (Chartuni, 2010). O comprimento da janela deslizante foi definido como um múltiplo do número de coeficientes do filtro somado à distância de predição.

No presente trabalho desenvolveu-se e testou-se uma adaptação do método de deconvolução preditiva adaptativa, estimando o valor do período P para o cálculo da distância de predição e o número de coeficientes do filtro. Como se deseja atenuar múltiplas de curto período, que estão normalmente associadas a camadas pouco espessas é possível fazer uma interpolação e descobrir o valor de P para cada posição (como visto na Figura 2.1) e, assim, realizar uma atualização dos parâmetros pra deconvolução preditiva. Definindo as equações demonstradas abaixo para o cálculo da distância de predição (L) e o número de coeficientes do filtro(N):

$$L = P - \left(\frac{perc * P}{2} \right) \quad (2.15)$$

$$N = perc * P \quad (2.16)$$

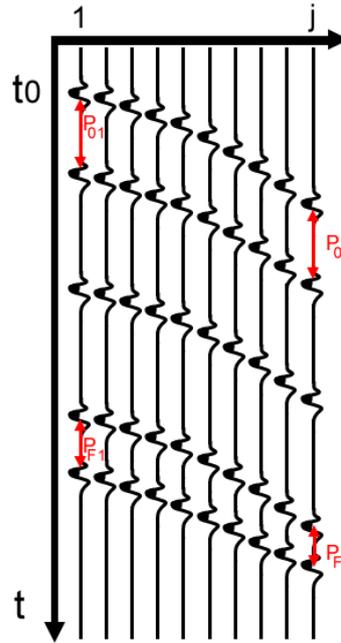


Figura 2.1: Variação dos períodos ao longo do traço sísmico.

Com a interpolação de P a partir de P_i (período inicial) e P_f (período final), consegue-se atualizar os valores dos períodos ao longo do traço a ser deconvolvido. Os valores do número de coeficientes do filtro e da distância de predição são dados por uma porcentagem do período analisado. Desta forma os valores precisam ser atualizados ao longo do traço sísmico, para cada nova posição j da janela de amostras utilizadas na deconvolução. Com esta metodologia para definição dos parâmetros, foi aplicado o método de deconvolução preditiva adaptativa em dados sintéticos e reais, conforme apresentado nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 3

Metodologia

No presente trabalho os métodos estudados, deconvolução preditiva de Wiener-Levinson e deconvolução preditiva adaptativa de Morf modificado, foram testados utilizando dados reais da Bacia de Jequitinhonha, depois de um processamento convencional realizado no *software* de processamento sísmico ProMax. Na aplicação da deconvolução preditiva adaptativa foram utilizadas rotinas FORTRAN desenvolvidas pelo LAGEP-UFBA e, para validar a sua eficácia foram também realizados testes com dados sintéticos.

3.1 Processamento convencional do dado sísmico

O método de reflexão é eficiente no imageamento da subsuperfície, porém o sinal sísmico é contaminado por ruídos. Dessa forma, é necessário aplicar um fluxograma de processamento sísmico para melhorar e tornar mais fidedigno o imageamento sísmico. Um destes ruídos coerentes é a reflexão múltipla, tendo como objetivo atenuá-las para que não estejam mais presentes na seção sísmica. Para realizar tal objetivo são necessárias algumas etapas que compreendem desde o pré-processamento até o processamento propriamente dito. No pré-processamento tem-se a geometria, a edição de traços ruidosos, *mute*/silenciamento de traços e filtragem de frequência. Do processamento avançado tem-se a análise de velocidades, a deconvolução, a correção de amplitude devido ao espalhamento geométrico, a correção de NMO, o empilhamento CMP e, finalmente, a migração.

3.2 Geometria

O levantamento de dados sísmicos consiste em dispor em um sistema de coordenadas espaciais, receptores e fontes. Os receptores, que são frequentemente chamados de canais, registram a variação da amplitude das frentes sísmicas, de maneira discreta sob um intervalo de amostragem, durante certo tempo de registro. O registro de cada canal é denominado de traço. Os traços são gravados em fitas magnéticas e depois transformados para a forma digital. As frentes de onda sísmica são inicialmente geradas pela fonte no ponto de tiro, onde é liberada energia em um amplo espectro de frequências. Conhecer e determinar as posições

exatas de cada fonte e seus respectivos receptores, os tipos de arranjos utilizados, o número de tiros realizados durante o levantamento, assim como a taxa de amostragem e o número de amostras por traço, consiste na etapa primordial do processamento sísmico, sendo estas coordenadas usadas em outras etapas do processamento. Caso existam erros nesta etapa, o processamento da linha sísmica será parcial ou totalmente perdido, pois o fluxo de processamento será realizado com posições incoerentes com aquelas que foram obtidas no momento da aquisição sísmica.

O objetivo é registrar no *header* de cada traço as coordenadas do ponto de tiro, receptor, do ponto médio comum e o *offset*. Essas informações são úteis para a organização dos traços em famílias CDP e também nas demais formas de organização do dado. A linha sísmica 214 – 0266 fez parte de uma aquisição sísmica realizada na Bacia de Jequitinhona, sul da Bahia, e este dado estão no formato SEG Y no acervo de dados do CPGG-UFBA. Os parâmetros de aquisição deste dado estão descritos na tabela 3.1.

Visando a atenuação de múltiplas de curto período, não havia necessidade de trabalhar com todo o dado, assim, ele foi cortado em 4s resultando em 1001 amostras.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS	PARÂMETROS UTILIZADOS
Lanço/Spread (m)	0 - 150 - 3125
Intervalo entre receptores (m)	25
Intervalo entre tiros (m)	25
Número de tiros	1577
Número de canais	120
Intervalo de amostragem (ms)	4
Número de amostras	1751
Tempo de registro (s)	7,00
Menor afastamento (m)	150
Maior afastamento (m)	3125

Tabela 3.1: Parâmetros de aquisição da linha sísmica 214 – 0266.

3.3 Edição e mute de traços ruidosos

Durante a aquisição podem ocorrer diversos problemas que comprometem a qualidade dos dados. A etapa da edição realiza um controle de qualidade nos dados sísmicos. Uma visualização prévia dos dados é feita. Os principais traços a serem editados são traços com baixa razão sinal/ruído, traços contaminados por alguma frequência associada à fontes elétricas, traços com amplitudes nulas devido a algum defeito em receptores de sinal sísmico.

A edição pode ser feita em qualquer etapa do processamento, desde que os processos aplicados ao dado venham resultar em ocasionais ruídos. Porém, costuma-se aplicar a edição na etapa do pré-processamento. O *software* ProMax utilizado no trabalho, possui métodos interativos para edição, onde pode-se visualizar o dado e identificar rapidamente os traços que são indesejados e eliminá-los.

O *mute* ou silenciamento dos traços é realizado com o objetivo de eliminar, ou seja, zerar amplitudes que são consideradas provenientes de um ruído. Foi realizado o *mute* de parte dos traços nas linhas processadas, estas partes representavam os registros das ondas diretas e de ruídos superficiais, e estavam localizadas acima dos registros da primeira reflexão, referente à reflexão primária no fundo do mar. Para eliminar esses traços ruidosos, aplicou-se uma edição automática, que retira os mesmo traços em todos os sismogramas pelo *software* ProMax.

3.4 Filtragem Passa-Banda

A filtragem de frequências é a etapa que tem como objetivo suprimir as bandas de frequência indesejáveis no dado sísmico e garantir certas bandas de frequência que estão associadas a eventos relevantes no dado. No presente trabalho foi utilizado, o filtro de frequência trapezoidal passa-banda. Seu princípio consiste em eliminar as frequências fora de um certo intervalo pré-determinado, a fim de remover as baixas e altas frequências que estão geralmente associadas a eventos ruidosos. Os valores de frequência utilizados na filtragem foram respectivamente 5, 10, 60 e 75Hz. Desta forma foi possível preservar as amplitudes presentes no intervalo compreendido entre 10 e 60Hz, eliminar valores menores que 5Hz e maiores que 75Hz e suavizar valores compreendidos entre 5 a 10Hz e 60 a 75Hz.

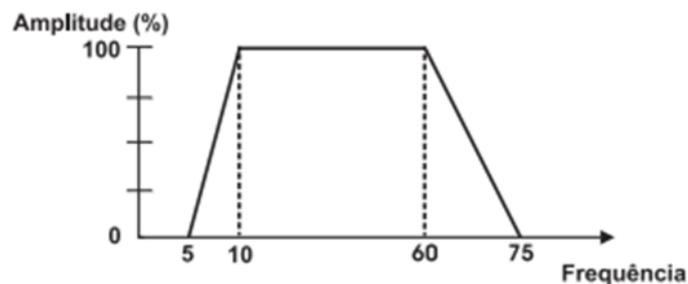


Figura 3.1: Filtro trapezoidal passa-banda e as respectivas frequências utilizadas.

Com a aplicação da filtragem trapezoidal pode ocorrer um aumento significativo na razão sinal/ruído, melhorando a resolução temporal. Antes da aplicação dos métodos de deconvolução de múltiplas, o fluxograma do pré-processamento básico composto por etapas fundamentais de preparação do dado é apresentado abaixo:

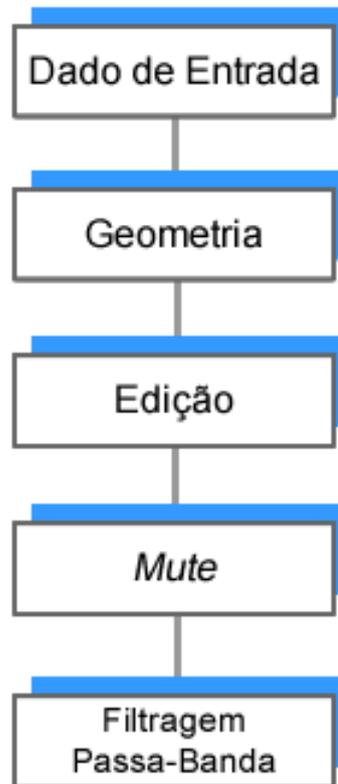


Figura 3.2: Fluxograma das etapas do pré-processamento.

3.5 Aplicação de Ganhos

Durante a propagação da onda elástica em um meio rochoso, fenômenos físicos atuam promovendo a diminuição da amplitude do sinal sísmico, ou seja, a atenuação do sinal. Como o traço sísmico representa a variação da amplitude com o tempo, se aquela for atenuada, sua evidência ficará omitida e o dado perderá a sua qualidade. Devido a isso, aplicou-se no dado o controle de ganho automático (AGC), para fazer a correção dos efeitos naturais de atenuação das amplitudes das ondas sísmicas durante sua propagação. O AGC é um tipo de ganho dependente da amplitude do dado, sendo sua vantagem ter um balanceamento do espectro de amplitude e a desvantagem é depois de aplicado ela não pode ser mais removida. Uma pequena mudança indesejada na amplitude do dado pode começar uma série de erros durante o fluxo de processamento (Cohen e Jr., 2002).

3.6 Análise de Velocidade e correção de NMO

Na etapa da análise de velocidade se tem o objetivo de estimar a velocidade que possa horizontalizar o máximo possível as hipérboles de reflexão, de tal modo que ao realizar a

etapa de empilhamento, as hipérbolas de reflexão devidamente horizontalizadas somar-se-ão produzindo um dado melhor empilhado com uma alta razão sinal/ruído. As velocidades de empilhamento são conhecidas através da análise de velocidade no domínio CMP. Utilizando as velocidades que melhor compensam as diferenças de sobretempo normal (NMO) das reflexões. Sabe-se que um CMP contém traços de uma reflexão de um mesmo ponto em subsuperfície, mas com diferentes trajetórias. Estas diferentes trajetórias geram diferentes tempos de transito e é justamente através da correção de NMO, a partir da função velocidade definida na análise de velocidade, que as hipérbolas de reflexão são horizontalizadas. A análise de velocidade não é efetuada com um único CMP, e sim com uma quantidade significativa de CMPs regularmente distribuídos. Por final, as velocidades são interpoladas para a correção de NMO e empilhar os CMPs.

3.7 Empilhamento CMP

Após a correção NMO, têm-se os traços das famílias CMP, devidamente horizontalizados, podem ser somados de forma construtiva por meio do empilhamento CMP. A soma construtiva destes traços de cada família CMP é denominada de empilhamento e a imagem obtida é chamada de seção empilhada. Assumindo que podem existir ruídos no dado sísmico, a razão sinal/ruído pode aumentar através do empilhamento. Isto é verificado pelo fato de que o ruído aleatório não pode ser somado construtivamente (Cohen e Jr., 2002). Depois de todo o conjunto de famílias CMP terem sido empilhadas, ou seja cada CMP ser reduzido a um único traço comum, os traços resultantes de cada CMP podem ser mostrados em sua ordem direta.

3.8 Migração

A última etapa do processamento realizado é a migração. A migração tem o objetivo de corrigir o mergulho dos refletores e colapsar as difrações existentes na seção em tempo. Foi aplicado neste trabalho, a migração pós empilhamento em tempo de Kirchoff na seção sísmica empilhada obtida com dados sísmicos após a deconvolução. A migração em tempo considera que o meio é descrito por um campo de velocidade sem variações laterais. Portanto, o campo de velocidade é determinante para a obtenção de uma seção migrada de boa qualidade ajudando, assim, no mapeamento das estruturas geológicas, na localização e identificação de possíveis trapas de hidrocarbonetos, se este for o objetivo do estudo.

3.9 Aplicação da deconvolução preditiva Wiener-Levinson com janelas de tempo fixas

A deconvolução de WL com janelas fixas foi realizado no *software* ProMax, que resolve as ENs através da RL e utiliza quatro janelas de tempo fixas $J_f(i), i = 1, 2, 3, 4$ para deconvolução. Para aplicação do método o dado foi organizado em famílias CMP e os parâmetros usados para a deconvolução estão na tabela 3.2. Os parâmetros para deconvolução adaptativa de Morf, sendo eles o numero de coeficiente do filtro e a distância de predição, foram determinados durante o processo de deconvolução adaptativa de Morf que está descrito logo a seguir.

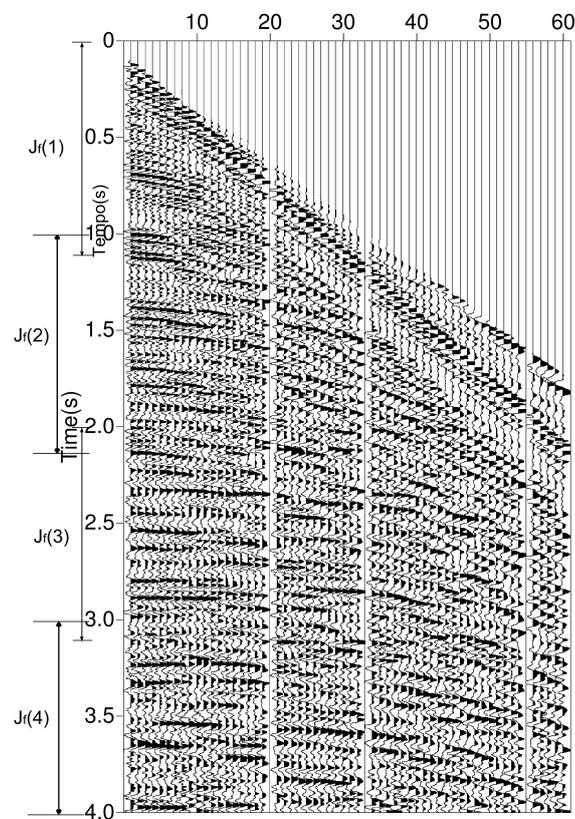


Figura 3.3: Janelas em tempo, $J_f(i)$, utilizadas para fazer a deconvolução no ProMax.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS	PARÂMETROS UTILIZADOS
Número de coeficientes de filtro (n)	25
Distância de predição (L)	5
Tamanho de cada janela de deconvolução em tempo (ms)	
$J_f(1)$	(0-1100)
$J_f(2)$	(1000-2100)
$J_f(3)$	(2000-3100)
$J_f(4)$	(3000-4000)

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados na deconvolução de WL com janelas fixas.

3.10 Aplicação da Deconvolução Preditiva Adaptativa em dado sintético

Para validar a eficácia do método de deconvolução preditiva de Morf modificado, aplicou-se o método em dados sintéticos. Os sismogramas sintéticos foram gerados utilizando uma subrotina FORTRAN. O método de deconvolução preditiva adaptativa foi testado em uma família de tiro comum contendo a primária do fundo oceânico e suas múltiplas. O intervalo de amostragem utilizado no dado sintético foi de 4 ms , com tempo de registro de 4 s , logo 1001 amostras. Foram gerados 60 tiros, com distância entre os tiros de 25 m , com distância entre estações de 25 m .

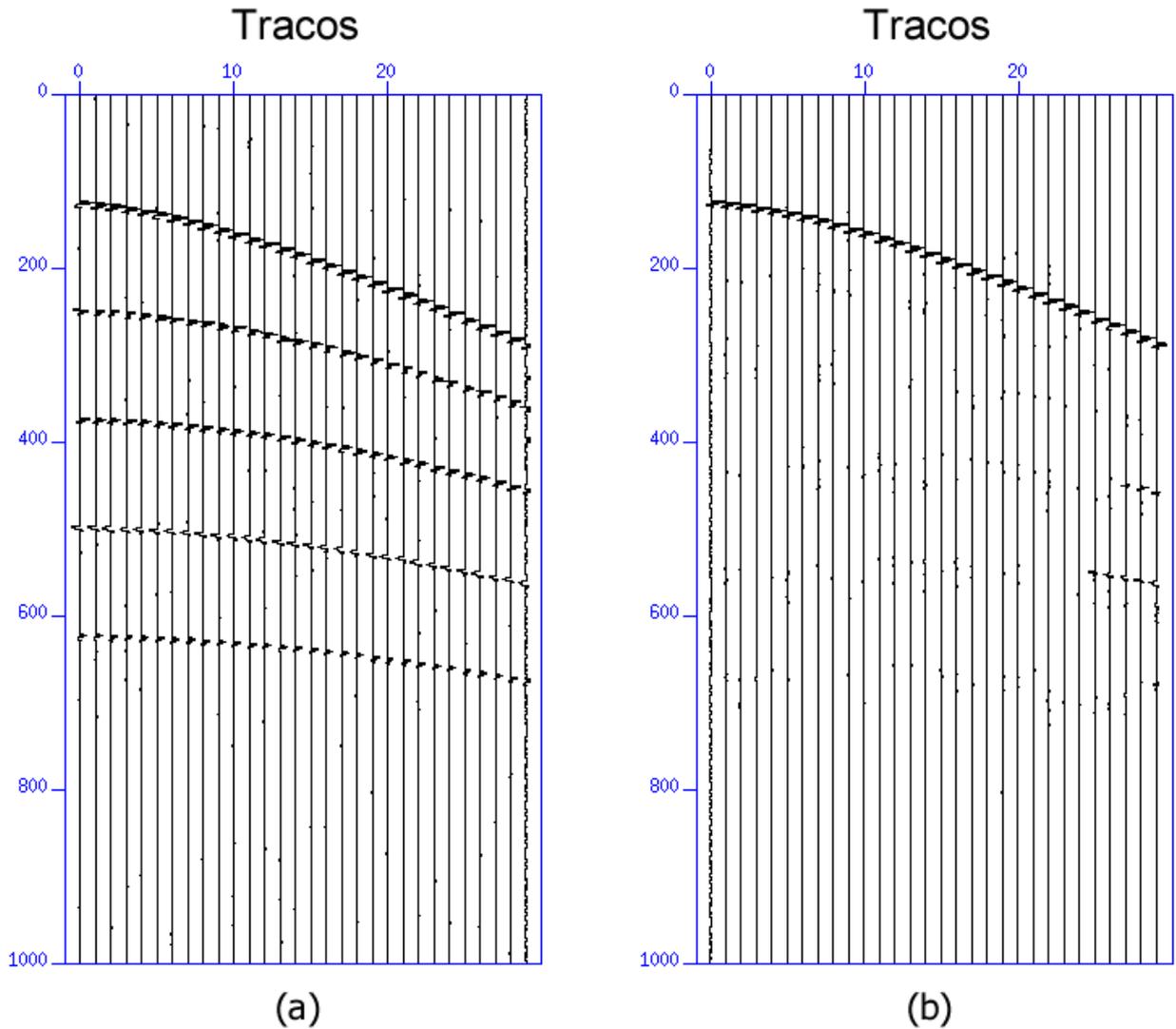


Figura 3.4: (a) Sismograma original. (b) Resultado após a deconvolução preditiva adaptativa.

Os resultados obtidos pelos métodos de deconvolução preditiva adaptativa demonstram que a predição e atenuação das múltiplas foram bem sucedidas. A partir dos resultados nota-se que a deconvolução preditiva adaptativa atenua as múltiplas e preserva a reflexão primária.

3.11 Aplicação do Método de Deconvolução Preditiva Adaptativa em dado real

A deconvolução preditiva adaptativa foi aplicada neste trabalho sobre a região da plataforma continental. Assim, a partir do dado sísmico referente à linha sísmica 214 – 0266 da Bacia do Jequitinhonha, foi selecionado do tiro 1 ao tiro 1200. Estes tiros foram selecionados para

a aplicação do método por conter as múltiplas de curto período na região da plataforma continental, além de conter nesta região selecionada refletores não muitos profundos e múltiplas bem próximas às reflexões, permitindo fazer uma estimativa através da interpolação dos valores dos períodos para a obtenção dos parâmetros utilizados na deconvolução preditiva adaptativa.

A deconvolução convencional, a qual utiliza valores fixos para o número dos coeficientes do filtro e também para a distância de predição, não é eficaz na remoção de múltiplas. Para a aplicação do método proposto são necessários apenas o tempo da primária, o número de tiros e a porcentagem do período para a definição do número de coeficientes do filtro e a distância de predição, desse modo os valores dos parâmetros necessários para a deconvolução preditiva adaptativa são utilizados a cada vez que a janela temporal deslizante se desloca ao longo do traço sísmico.

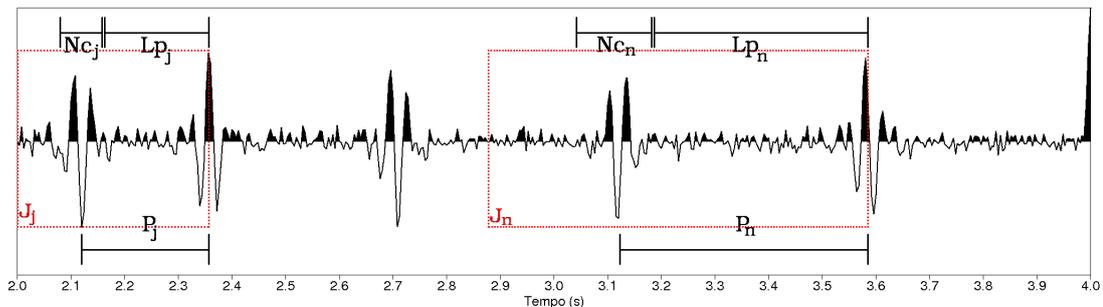


Figura 3.5: Atualização dos parâmetros para deconvolução preditiva dentro de um mesmo traço. Chartuni (2010).

Na Figura 3.6 tem-se a região mais rasa da seção é onde se encontra múltiplas de curto período. As reflexões primárias tendem a apresentar amplitude menor em comparação com as múltiplas devido à atenuação sofrida pela transformação ou perda de energia à medida que maior for a trajetória da onda. Observando a Figura 4.2 nota-se que através da aplicação da deconvolução preditiva adaptativa no CMP bruto, a atualização dos parâmetros da deconvolução proporciona de forma eficiente o funcionamento do filtro de predição e atenuação dos eventos múltiplos que não se encontram mais periódicos ao longo do traço sísmico.

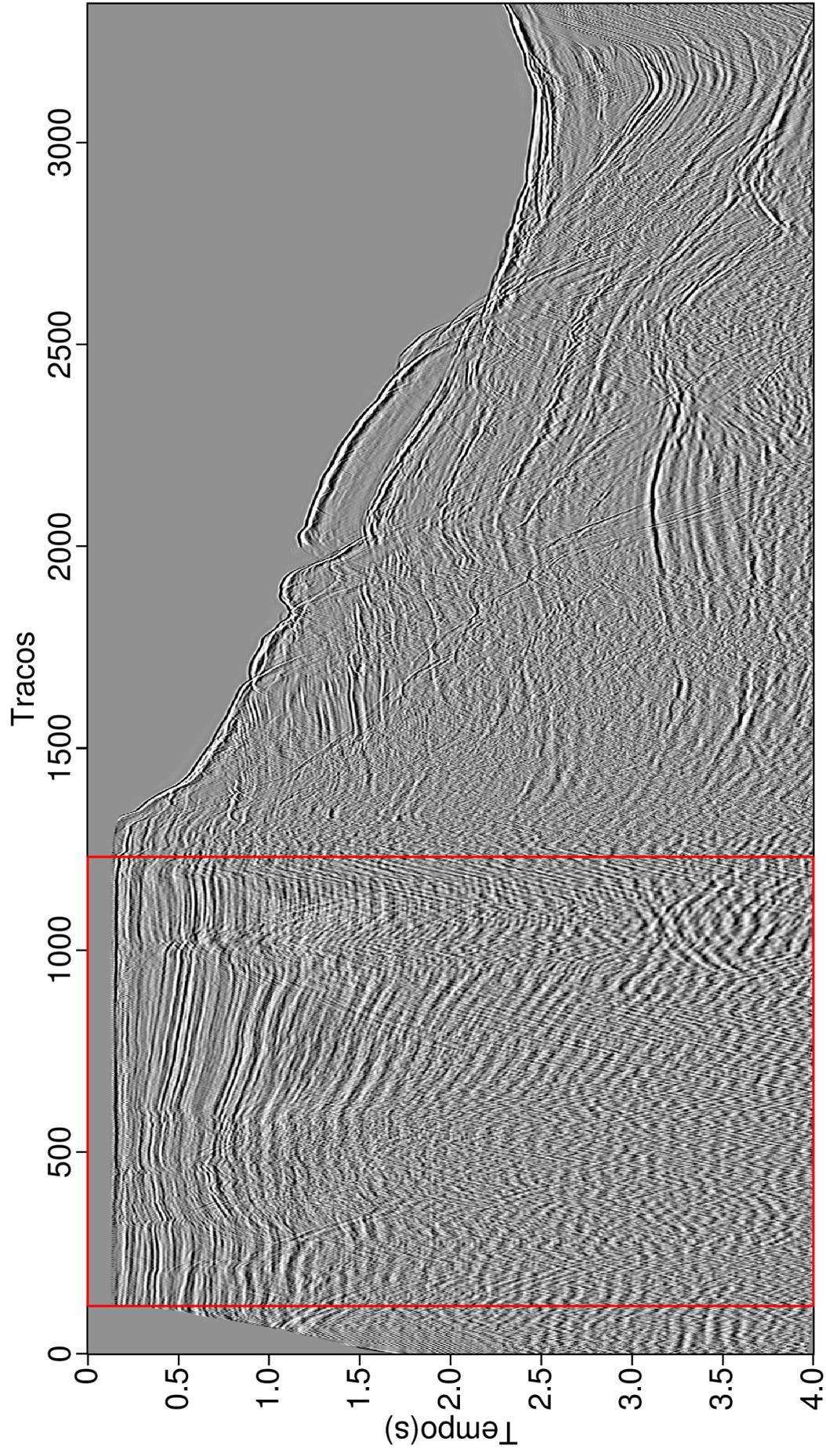


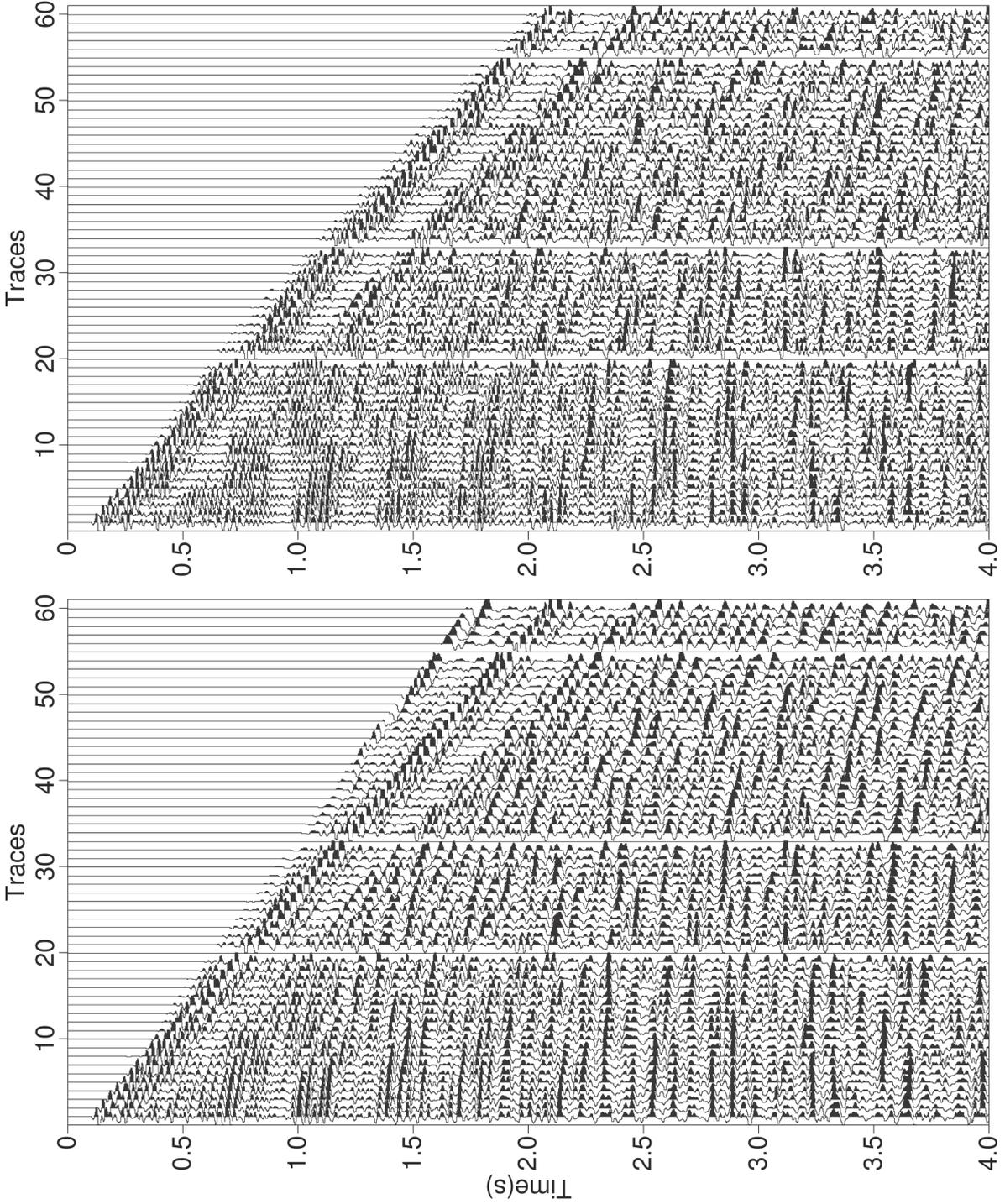
Figura 3.6: Tiros selecionados para deconvolução preditiva adaptativa.

CAPÍTULO 4

Resultados

4.1 Aplicação do Método de Deconvolução Preditiva de WL com janelas fixas no tempo

O método foi aplicado no domínio CMP, inicialmente utilizou-se o CMP 298, que se encontra na parte na plataforma continental contendo múltiplas de curto período, para a realização de testes com o intuito de verificar os melhores parâmetros a serem utilizados na deconvolução preditiva de WL com janelas fixas no tempo. O melhor resultado obtido com o número de coeficientes do filtro (n) igual a 25 amostras (0,10s) e a distância de predição (L) igual a 5 amostras (0,02s) como demonstrado na Figura 4.1 (b). Fazendo uma comparação entre a Figura 4.1 (a) e a Figura 4.1 (b), observa-se que boa parte das reverberações que se repetem em todo o CMP em (a), consegue ser atenuado em (b), e que os eventos mais bem definidos e comprimidos em (b) do que em (a). Portanto, os parâmetros utilizados na deconvolução mostraram resultados favoráveis.



(b)

(a)

Figura 4.1: CDP 298 (a) original (b) após a deconvolução preditiva WL com janelas fixas no tempo.

4.2 Resultados da deconvolução preditiva adaptativa

A deconvolução preditiva adaptativa foi aplicada no domínio CMP, utilizamos inicialmente o CMP 298. Foi realizado testes variando o valor do percentual para verificar qual melhor valor deste parâmetro a ser utilizado no método que consegue atenuar as múltiplas. Ao utilizarmos $perc = 0, 10$, verificamos que os resultados obtidos com este parâmetro (Figura 4.2 (b)) são melhores e preservam as reflexões primárias. Observamos na Figura 4.2 (b) que ocorre atenuação das múltiplas de curto período em toda a região de lâmina rasa e abaixo do tempo 1,5s a atenuação é mais efetiva com a deconvolução preditiva adaptativa Morf do que com a deconvolução adaptativa de WL.

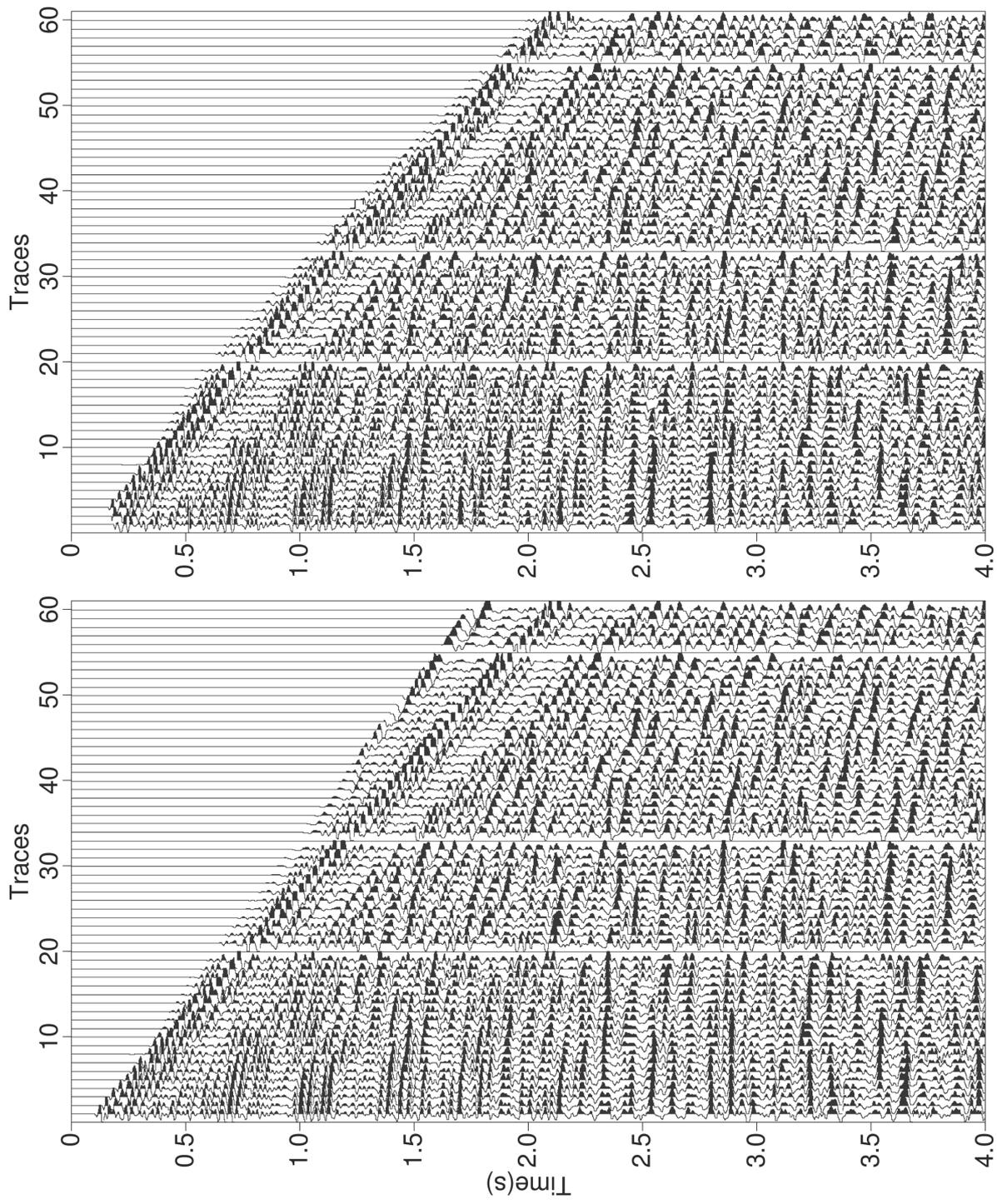


Figura 4.2: CDP 298 (a) original (b) após a deconvolução preditiva adaptativa.

CAPÍTULO 5

Etapas finais do processamento

As etapas finais do processamento foram realizadas utilizando o *software* PROMAX. Antes da aplicação dos métodos de deconvolução vistos, foi feita uma análise de velocidade preliminar, para a obtenção de uma seção sísmica empilhada para compararmos com as seções finais obtidas após a aplicação dos métodos de deconvolução. A Figura 5.8 mostra o fluxograma utilizado para a obtenção da seção sísmica empilhada preliminar.

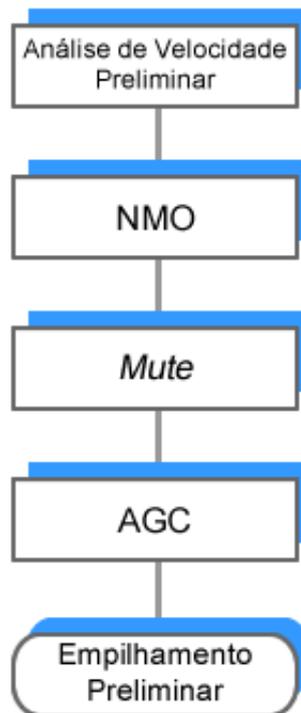


Figura 5.1: Fluxograma do processamento usado para obtenção da seção sísmica empilhada preliminar.

A análise de velocidade preliminar foi feita com um intervalo de 100 CDP's e começou no CDP 298 até o CDP 3198, resultando em 29 análises. Como na análise preliminar não foi ainda utilizado nenhum método de deconvolução para a atenuação de múltiplas é possível observar uma forte presença de múltiplas de curto período no espectro de velocidade (Figura 5.2).

Após a análise de velocidade é feita uma correção NMO com as velocidades definidas durante a análise de velocidade preliminar. Posteriormente foi aplicado um controle de ganho automático (AGC) e é feito o empilhamento da seção sísmica preliminar que é mostrado na Figura 5.3.

A aplicação da deconvolução preditiva WL ocasionou um aumento no conteúdo de alta frequência, por isso, foi necessário fazer uma filtragem de frequência com o uso do filtro trapezoidal passa-banda (PB). As frequências utilizadas nesta filtragem foram: 5 Hz, 10 Hz, 55 Hz, 75 Hz. Após a filtragem PB foi realizado uma nova análise de velocidade com os dados obtidos com a deconvolução preditiva WL. A análise foi feita na região de lâmina d'água mais rasa, utilizando um intervalo de 50 CDP's, do CDP 298 até o CDP 1298. Foram realizadas 20 análises, pois nesta região se encontra uma forte presença de múltiplas de curto período. Na região da quebra do talude foi mantido o intervalo de 100 CDP's resultando em mais 19 análises, resultando em 39 análises realizadas no dado todo.

Após a análise de velocidade foi realizada a correção NMO. Aplicou-se também o *mute* manual com intervalo de 50 CDP's e, em seguida, aplicou-se o AGC e foi feito o empilhamento com o dado obtido após a deconvolução preditiva WL.

O dado utilizado na deconvolução preditiva adaptativa está localizado na região de lâmina d'água rasa, o que possibilitou uma análise de velocidade mais detalhada. Utilizou-se um intervalo de 50 CDP's e começou no CDP 298 até o CDP 1298. Nesta análise foi possível verificar que o espectro de velocidade não apresenta mais uma enorme contaminação causada pelas múltiplas de curto período (Figura 5.6). Foi realizada a correção NMO no dado obtido após a deconvolução preditiva adaptativa e em seguida o empilhamento do dado.

A Figura 5.5 é a seção empilhada utilizando a deconvolução preditiva WL em janelas de tempo fixas. Observa-se que há uma grande atenuação das múltiplas de curto período comparado com a seção empilhada preliminar. A Figura 5.6 é a seção sísmica empilhada utilizando a deconvolução preditiva adaptativa. Nota-se que o resultado foi melhor do que o obtido com a deconvolução preditiva WL, comparando a região da plataforma continental presente nos dois casos. Alguns eventos ficaram mais definidos e as múltiplas de curto período foram bastante atenuadas, representando, assim, o melhor resultado.

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram duas regiões ampliadas das seções empilhadas, em (a) tem-se a seção empilhada após a deconvolução preditiva de WL e em (b) a seção empilhada após a deconvolução adaptativa de Morf. Nestas duas figuras destacam-se duas regiões que ficaram bem evidentes a atuação dos dois métodos para a conclusão que a deconvolução preditiva adaptativa de Morf possui melhores resultados.

A última etapa do processamento sísmico realizado foi a migração, com o objetivo de corrigir o mergulho dos refletores e colapsar as difrações existentes na seção em tempo. A migração em tempo Kirchoff foi feita pós empilhamento na seção sísmica empilhada obtida

com os dados deconvolvidos em ambos os métodos. A migração em tempo considera que o meio é descrito por um campo de velocidade sem variações laterais. Portanto, o campo de velocidade é determinante para a obtenção de uma seção migrada de qualidade para ser usada na interpretação, pois uma seção migrada de qualidade ajuda no mapeamento das estruturas geológicas na localização e identificação de possíveis trapas de hidrocarbonetos.

Os principais parâmetros que foram utilizados para fazer a migração foram o campo de velocidade e o ângulo de migração. Os resultados das migrações realizados estão ilustrados nas Figura 5.9 e Figura 5.10. Observa-se que as regiões das falhas ficaram mais definidas e alguns refletores apresentam melhores continuidades.

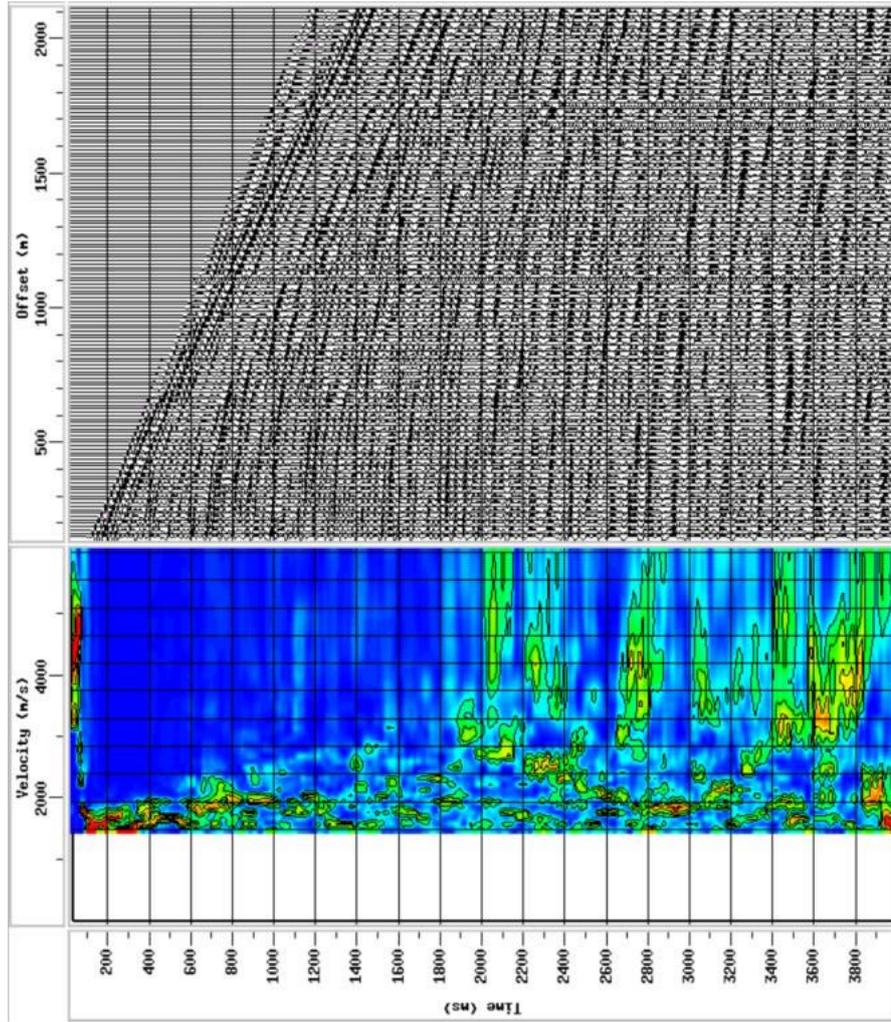


Figura 5.2: Espectro de velocidade preliminar.

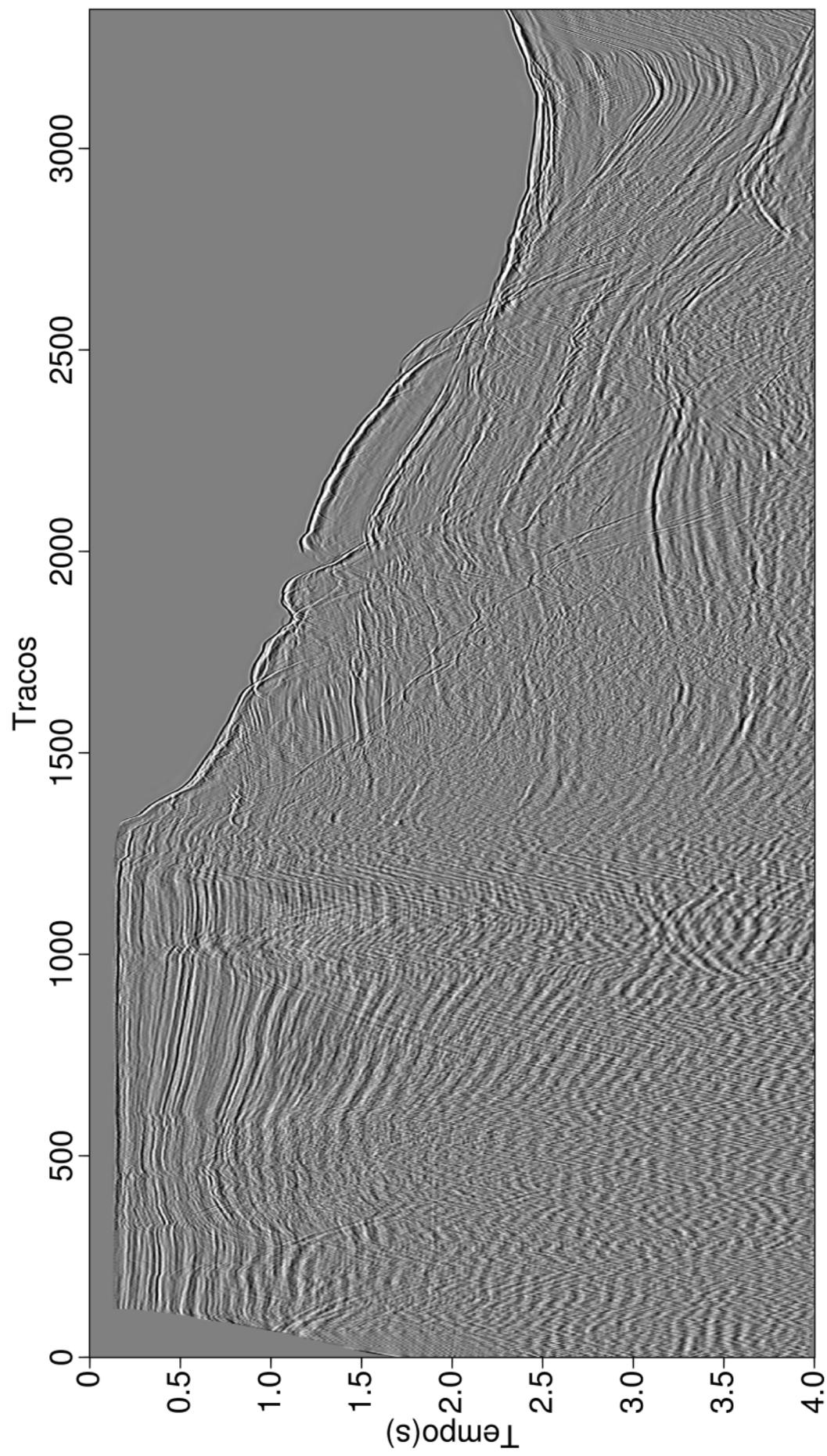


Figura 5.3: Seção empilhada preliminar.

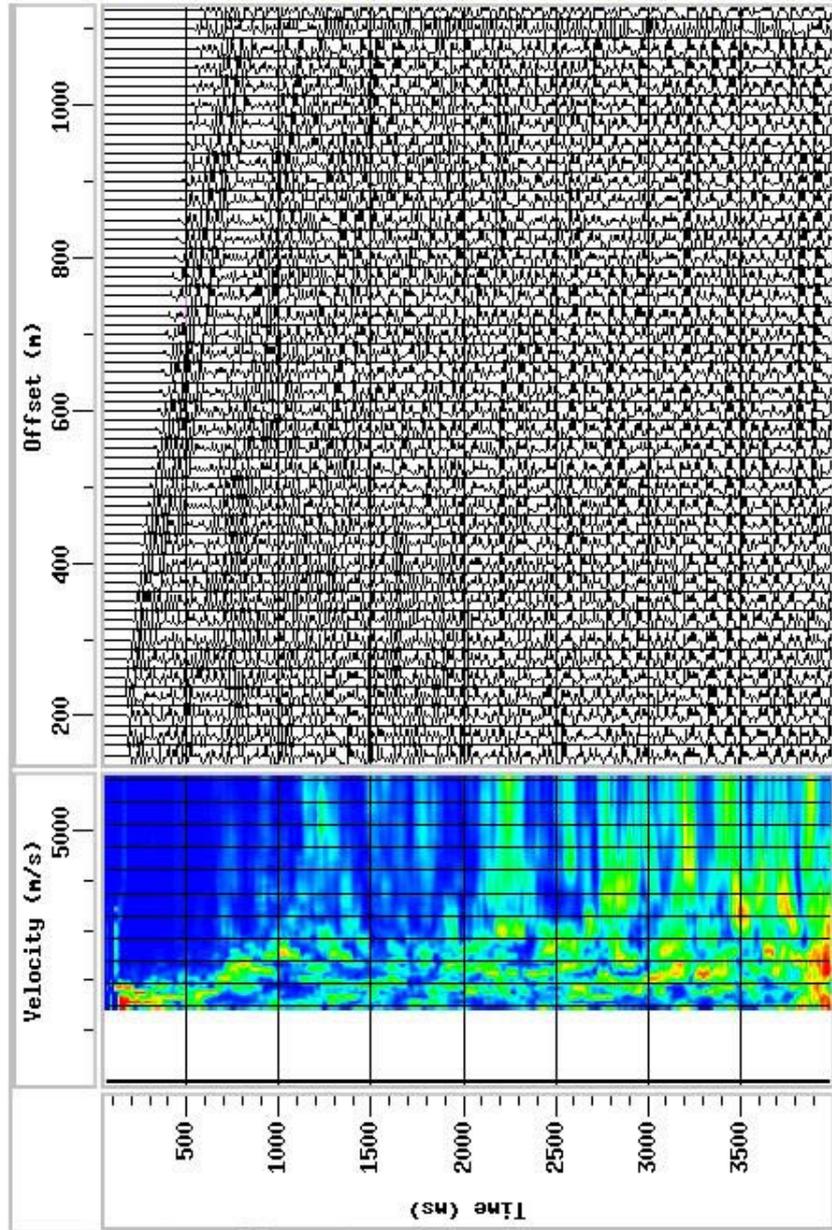


Figura 5.4: Análise de velocidade final.

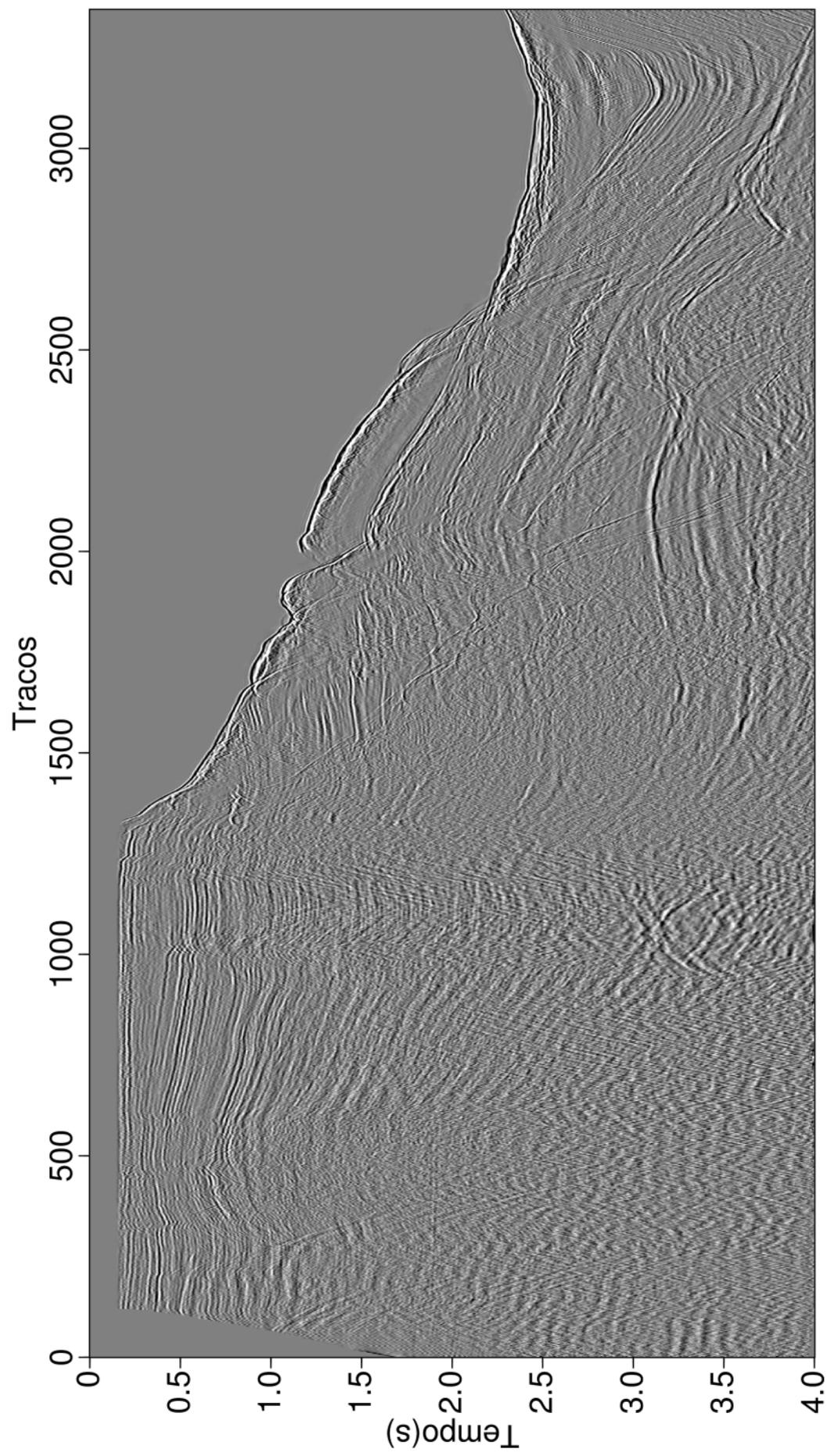


Figura 5.5: Seção empilhada após a deconvolução preditiva de WL com janelas fixas.

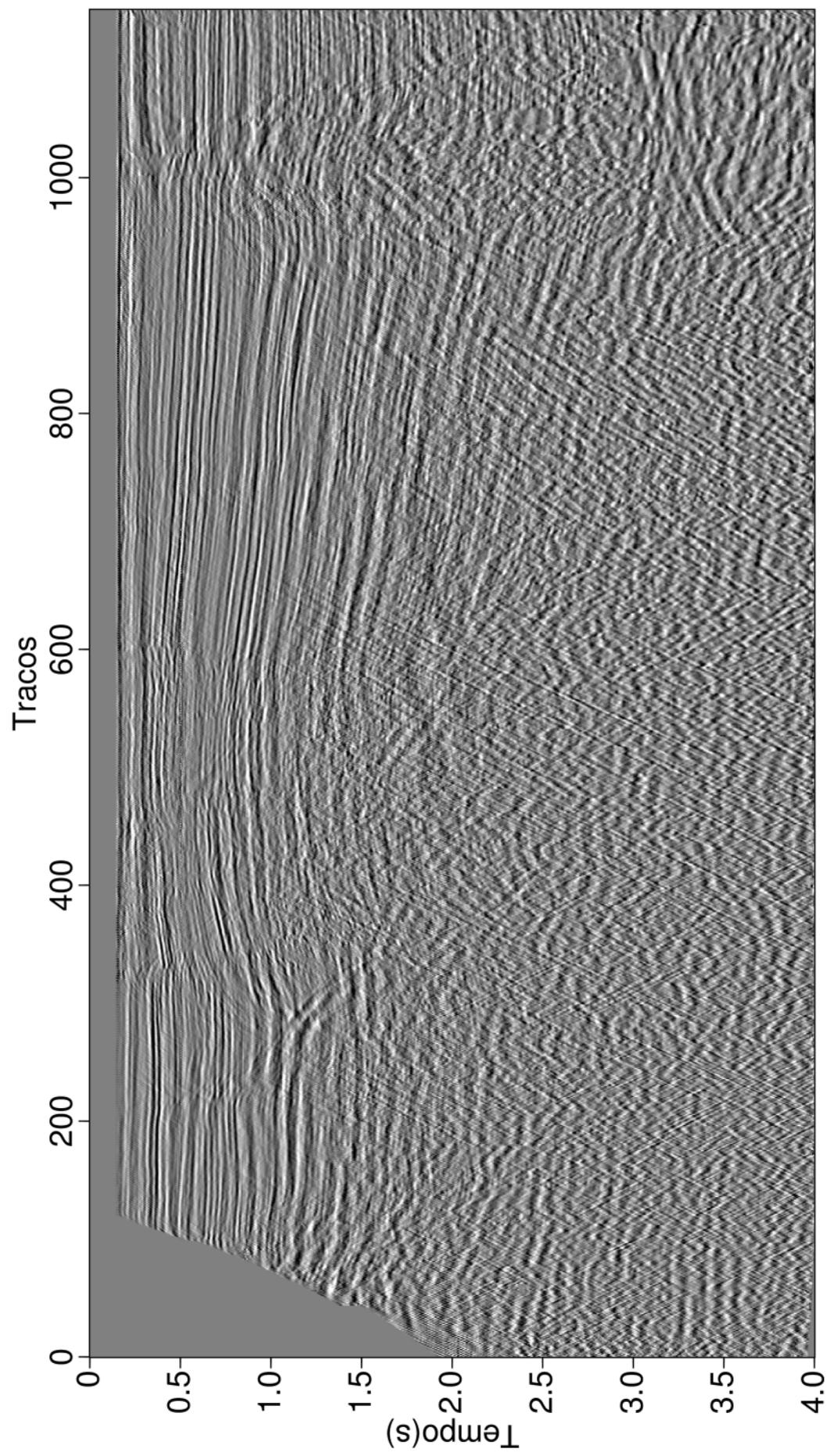


Figura 5.6: Seção empilhada após a deconvolução preditiva adaptativa de Morf.

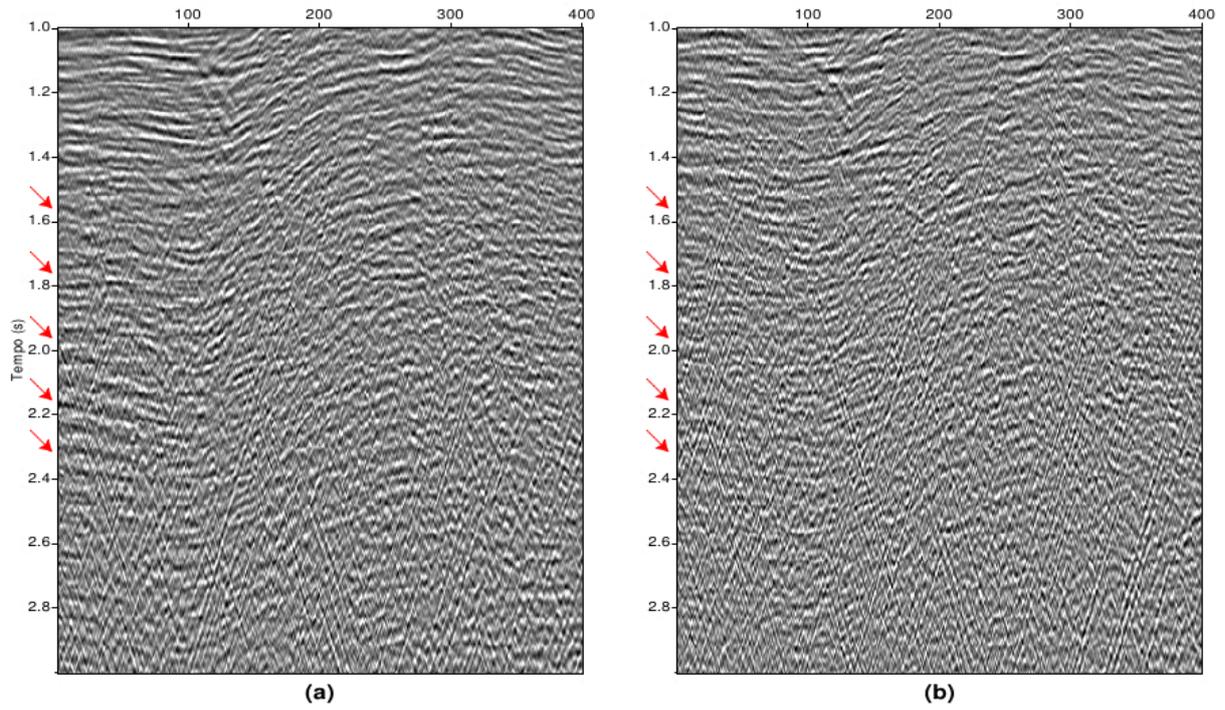


Figura 5.7: (a) Área ampliada da seção empilhada após a deconvolução preditiva de WL e (b) após deconvolução adaptativa de Morf.

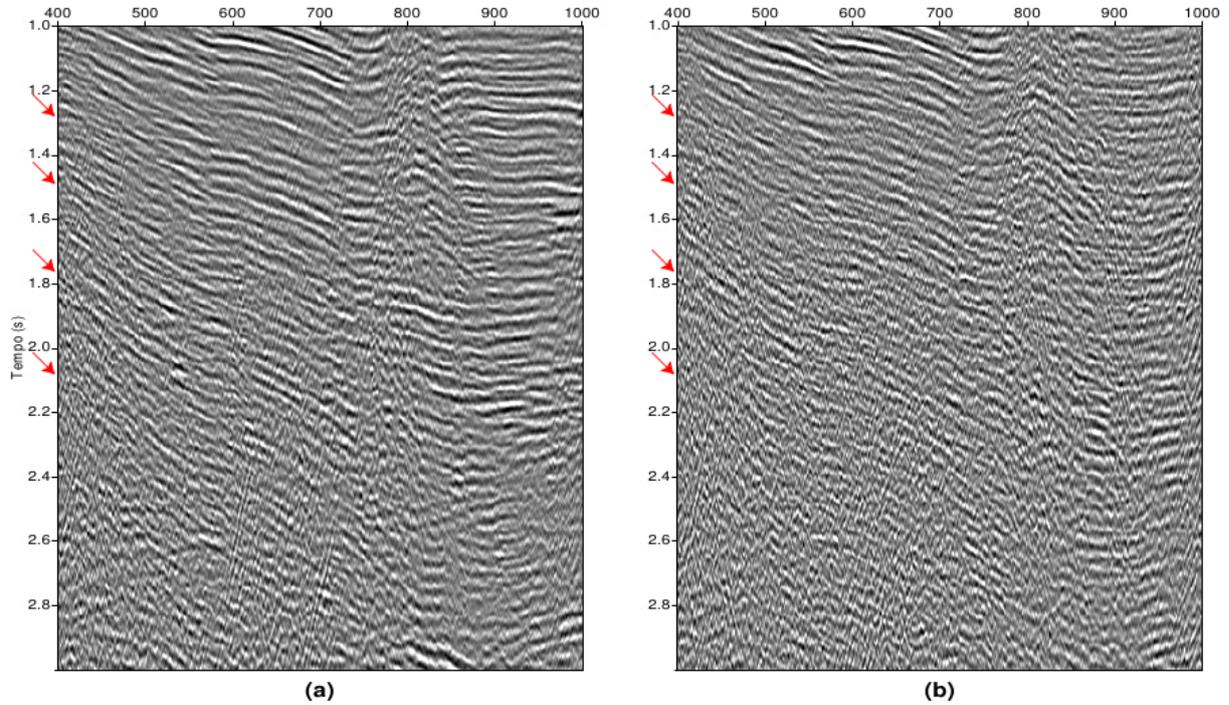


Figura 5.8: (a) Comparação dos resultados em uma área ampliada em da seção empilhada após deconvolução preditiva de WL e (b) após deconvolução adaptativa de Morf.

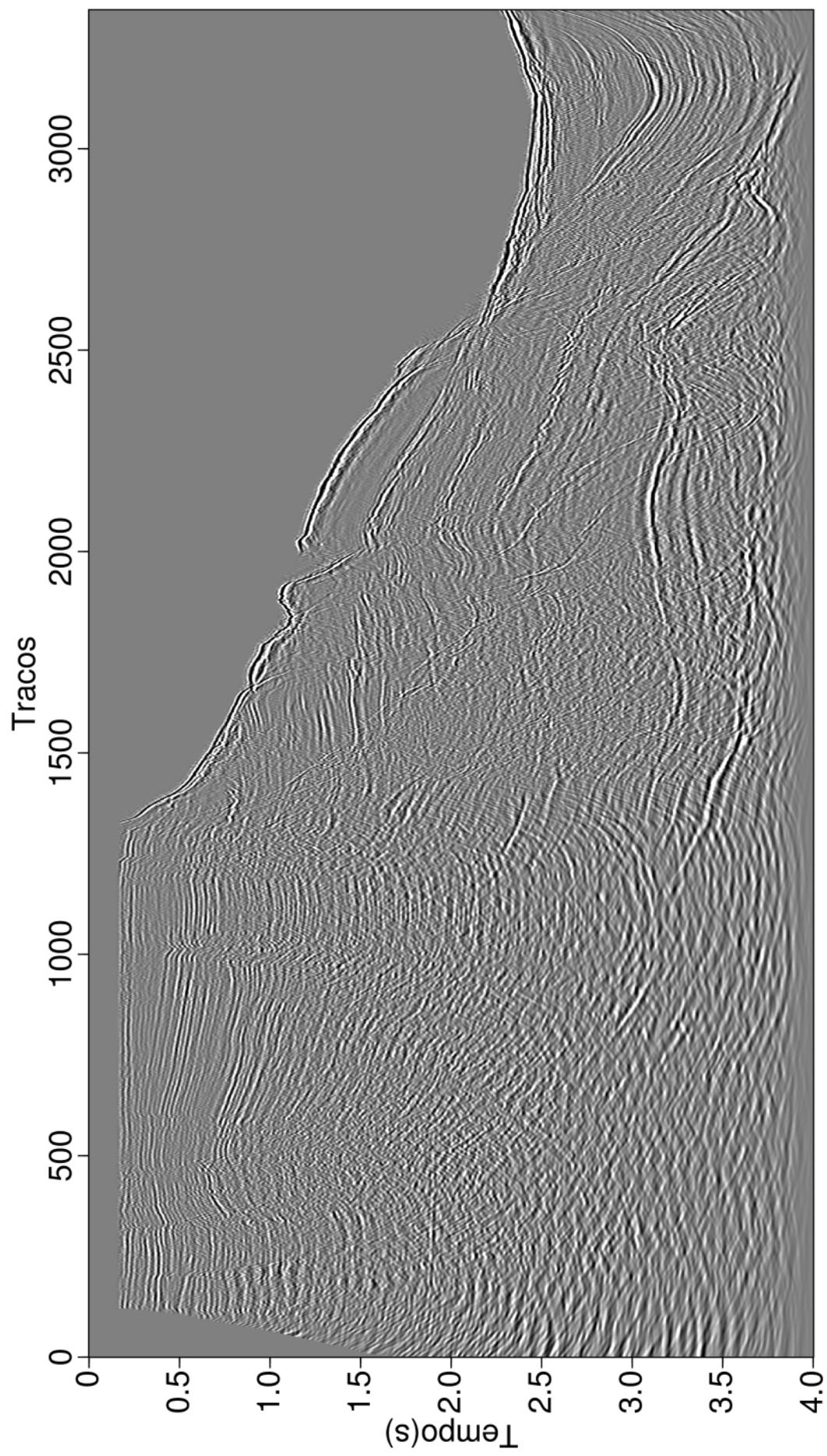


Figura 5.9: Seção migrada após deconvolução adaptativa de WL.

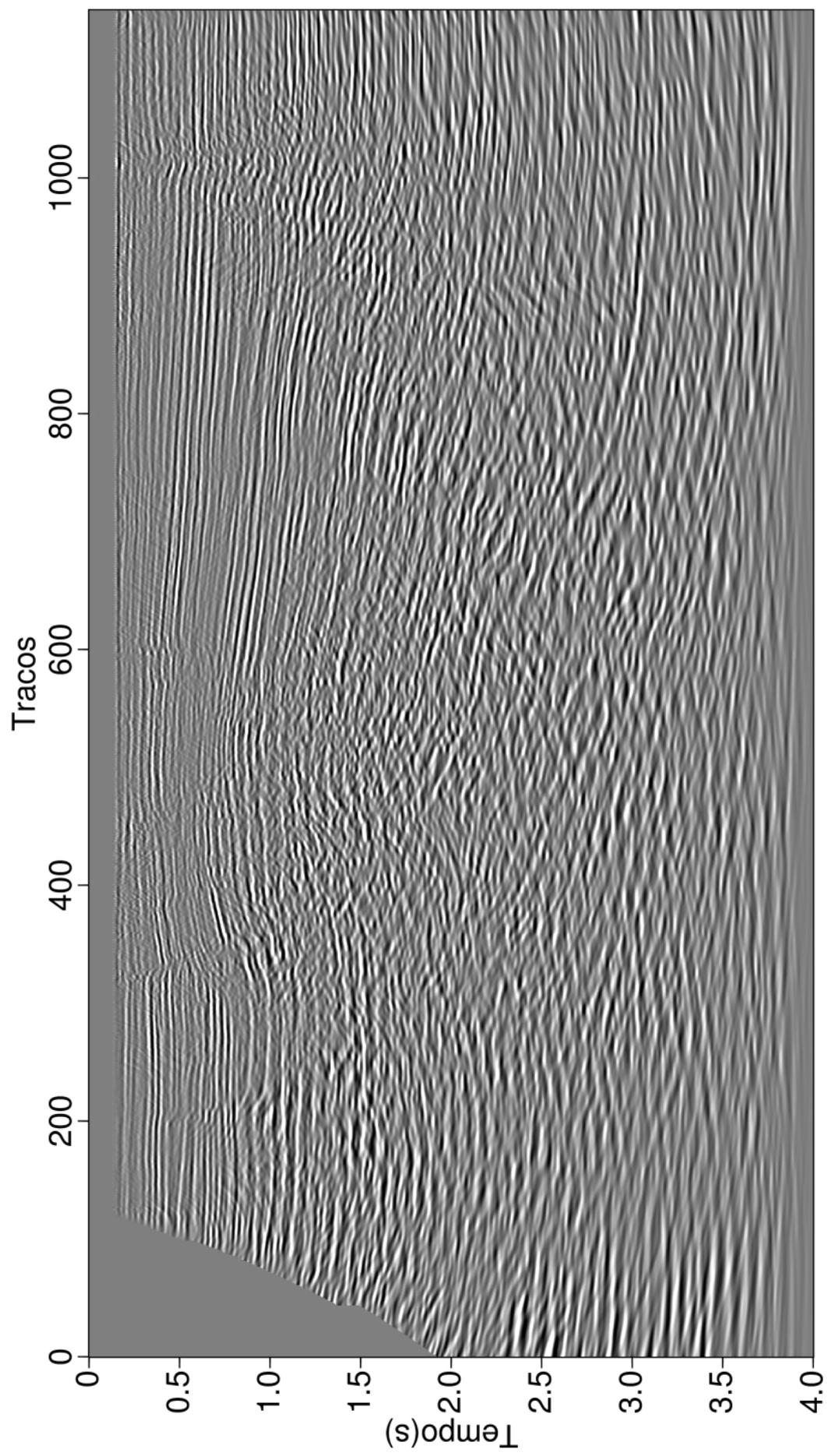


Figura 5.10: Seção migrada após deconvolução adaptativa de Morf.

5.1 Fluxograma final

O fluxograma final com todas as etapas do processamento deste trabalho está mostrado na figura a seguir:

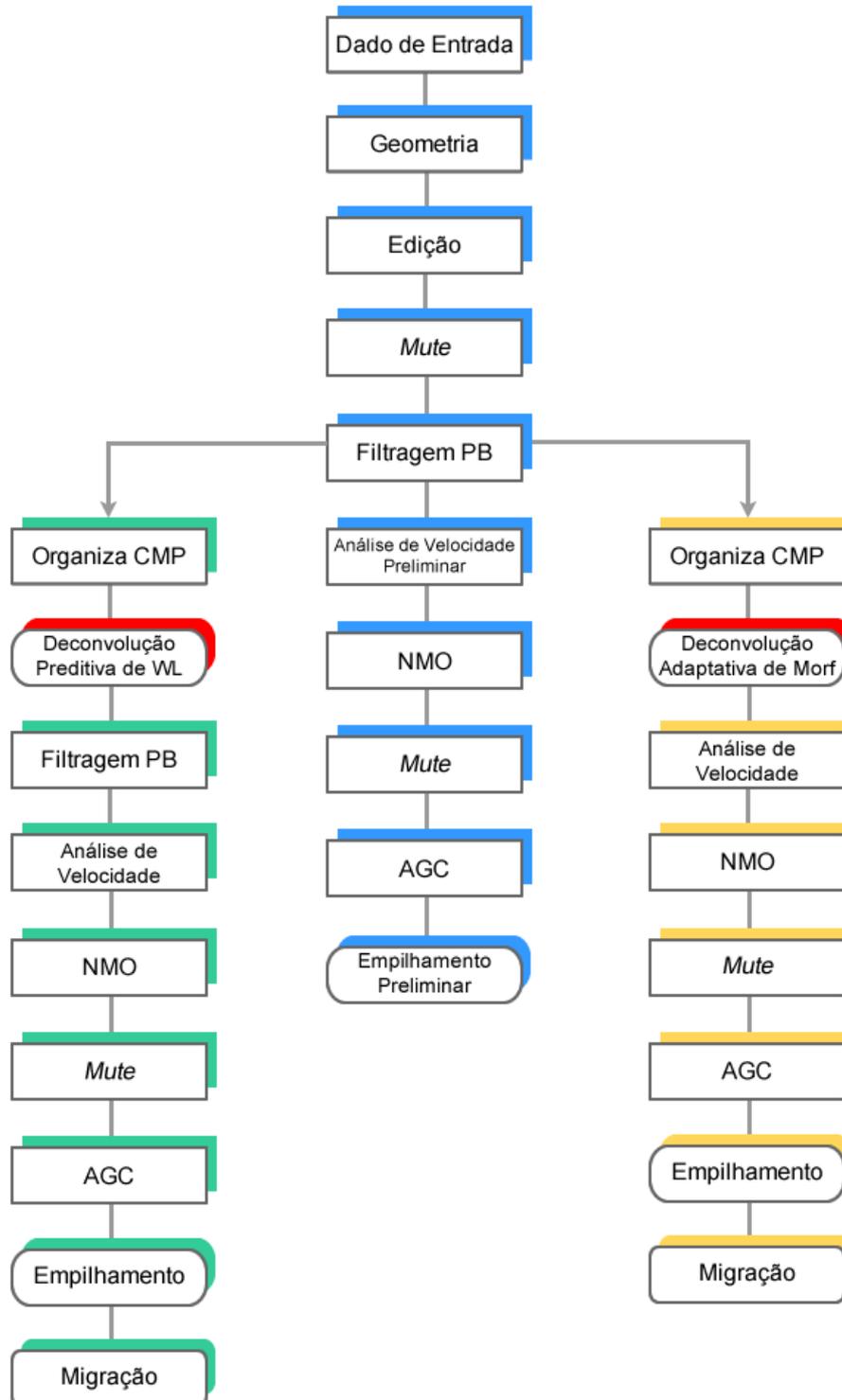


Figura 5.11: Fluxograma final do processamento adotado no trabalho.

CAPÍTULO 6

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. Em dados sísmicos de lâmina d'água rasa tem-se a presença de múltiplas de curto período presentes em sismogramas marinhos, estas múltiplas se superpõem as reflexões de interesse mascarando as mesmas.

O método de deconvolução preditivo de WL utilizando 4 janelas fixas apresentou bons resultados porém exige que o início e o fim da janela sejam cuidadosamente definidos. As atenuações das reflexões múltiplas obtidas com os dados sintéticos e marinhos reais da Bacia do Jequitinhonha comprovaram a eficácia do método de deconvolução preditiva adaptativa utilizando o algoritmo de Morf modificado por Porsani (1986). A interpolação feita para encontrar o período em cada posição influenciou na qualidade dos resultados na deconvolução preditiva adaptativa.

Os procedimentos de processamento adotados que foram demonstrados no fluxograma final mostraram que foram efetivos na retirada de múltiplas de curto período da linha sísmica 214-0266 da Bacia do Jequitinhonha, sendo o método preditivo adaptativo apresentou melhores resultados conforme visto na seção sísmica empilhada. Este resultado permitiu a geração de uma seção migrada com boa qualidade que é muito importante para a interpretação sísmica.

Diante dos bons resultados obtidos na atenuação de múltiplas de curto período, conclui-se que a deconvolução preditiva adaptativa é uma ferramenta que pode ser utilizada no processamento sísmico, podendo ser de grande valor para a indústria do petróleo. Uma recomendação para futuros trabalhos é desenvolver e testar a deconvolução preditiva adaptativa de Morf na forma multicanal.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, por todo amor, ensinamentos e apoio, sempre presentes ao longo de toda a minha vida.

A minha irmã e meu sobrinho, por todo carinho dado, apoio e muitos momentos felizes.

Aos meus familiares, que sempre deram suporte afetivo indispensável na minha formação.

Aos meus amigos por me incentivar, apoiar em todos os momentos de minha vida. Em especial para meu querido Danilo Kleber, palavras são brutas para descrever o carinho e todo o aprendizado compartilhado ao longo destes anos de amizade. Contemplação infinda, nessas sutilezas do caminhar. Sua amizade é uma dádiva, um oásis. Faz-se presente nos mais inférteis dos solos: esta sociedade líquido-moderna. Desse oásis nascem os mais sinceros dos sorrisos.

Agradecimento especial ao meu namorado por todo amor, pelo incentivo, compreensão, ajuda, dedicação e companhia indispensável. Ele foi essencial para que esta etapa fosse concluída de forma mais suave.

Ao meu orientador Dr. Milton Porsani, por toda sua orientação e ensinamentos que levarei tanto para minha vida profissional e pessoal, além de sempre dedicado, compreensivo, incentivador e pela confiança depositada em mim.

A Michelângelo que foi muito importante na etapa de aprendizado do uso de softwares, sempre solícito e atencioso.

Aos professores, pela competência, experiência e ensinamentos; em especial ao professor Reynam Pestana pela grande ajuda nessa etapa de conclusão do curso.

Ao PIBIC pelas bolsas de iniciação científica.

Ao LAGEP-CPGG-UFBA por todo o apoio técnico indispensável no trabalho.

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

APÊNDICE A

Recursao de Levinson monocanal de predição arbitrária $L > 1$

A recursão de Levinson resolve o sistema de equações normais de forma eficiente. A recursão tem início com a obtenção de duas soluções independentes de ordem 1,

$$(r_L \ r_0 \ r_1) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ a_{1,1} & b_{1,1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = (0 \ 0), \quad (\text{A.1})$$

sendo que,

$$a_{1,1} = -\frac{r_L}{r_0} \quad e \quad (\text{A.2})$$

$$b_{1,1} = -\frac{r_1}{r_0}. \quad (\text{A.3})$$

Combinando linearmente a_{11} e b_{11} através do relacionamento de Levinson obtém-se o primeiro filtro de dois elementos,

$$\begin{pmatrix} 1 \\ a_{2,1} \\ a_{2,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a_{1,1} \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix} 0 \\ b_{1,1} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Para escrever as ENs associadas ao vetor de dois coeficientes utiliza-se a relação de Levinson,

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_L & r_{L+1} \\ r_L & r_0 & r_1 \\ r_{L+1} & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ a_{1,1} \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix} 0 \\ b_{1,1} \\ 1 \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} E_{a,2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

Consideramos que $(1 \ a_{11} \ 0)^T$ e $(0 \ b_{11} \ 1)^T$ satisfazem a Equação (A.1) no cálculo do valor apropriado para α ,

$$\begin{bmatrix} (r_0 \ r_L) \begin{pmatrix} 1 \\ a_{1,1} \end{pmatrix} & (r_L \ r_{L+1}) \begin{pmatrix} b_{1,1} \\ 1 \end{pmatrix} \\ (r_{L+1} \ r_1) \begin{pmatrix} 1 \\ a_{1,1} \end{pmatrix} & (r_1 \ r_0) \begin{pmatrix} b_{1,1} \\ 1 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{a,2} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

Sendo,

$$E_{a,1} = (r_0 \ r_L) \begin{pmatrix} 1 \\ a_{1,1} \end{pmatrix}, e \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta_{a,1} = (r_{L+1} \ r_1) \begin{pmatrix} 1 \\ a_{1,1} \end{pmatrix}, \quad (\text{A.8})$$

escreve-se a forma compacta a seguir,

$$\begin{bmatrix} E_{a,1} & \widehat{\Delta}_{a,1} \\ \Delta_{a,1} & E_{b,1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_{2,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{a,2} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.9})$$

Considerando a simetria da matriz de coeficientes representada em (A.5), vê-se que $\Delta_{a,1} = \widehat{\Delta}_{a,1}$. Dessa forma, a partir de (A.9) podemos obter o valor de α_2 conforme expressão,

$$\alpha_2 = -\frac{(r_L \ r_{L+1}) \begin{pmatrix} b_{11} \\ 1 \end{pmatrix}}{(r_1 \ r_0) \begin{pmatrix} b_{11} \\ 1 \end{pmatrix}} = -\frac{\widehat{\Delta}_{a,1}}{E_{b,1}} = a_{2,2}. \quad (\text{A.10})$$

O filtro preditivo de 2 coeficientes é determinado ao continuar com a aplicação da recursão, uma vez que $a_{1,1}$, $b_{1,1}$, α_2 são conhecidos, e substituindo-os na equação (A.4) obtêm-se o filtro de três coeficientes,

$$\begin{bmatrix} r_L & r_0 & r_1 & r_2 \\ r_{L+1} & r_1 & r_0 & r_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ a_{2,1} & b_{2,2} \\ a_{2,2} & b_{2,1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.11})$$

no sistema de equações (A.11) $b_{2,1}$ e $b_{2,2}$ são desconhecidos, após calculados, serão utilizados no relacionamento de Levinson para obter filtro de três coeficientes,

$$\begin{pmatrix} 1 \\ a_{3,1} \\ a_{3,2} \\ a_{3,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ a_{2,1} \\ a_{2,2} \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha_3 \begin{pmatrix} 0 \\ b_{2,2} \\ b_{2,1} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.12})$$

agora, apenas o valor de $\alpha_3 = a_{3,3}$ é desconhecido, o qual pode ser obtido da mesma forma que $\alpha_2 = a_{2,2}$ foi encontrado. Sendo que, $b_{2,1}$ e $b_{2,2}$ são os coeficientes do filtro de predição unitária e também são obtidos através da Recursão de Levinson (Porsani e Ursin, 2007).

A expressão (A.9) pode ser reescrita de forma generalizada,

$$\begin{bmatrix} E_{a,j-1} & \widehat{\Delta}_{a,j-1} \\ \Delta_{a,j-1} & E_{b,j-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_{j,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{a,j} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.13})$$

onde,

$$\Delta_{h,j-1} = \begin{bmatrix} r_{L+j-1} & r_{j-1} & r_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_{j-1,1} \\ \vdots \\ a_{j-1,j-1} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.14})$$

Sendo possível adotar este procedimento repetidas vezes até a obtenção de um filtro de n coeficientes.

APÊNDICE B

Programa em FORTRAN

```
!-----
allocatable x(:), xdec(:), Pi(:), Pf(:), i0(:), i1(:), lw(:), xaux(:), d(:, :), p(:)
  ns=1001
  nt=1
  perc=0.30
  allocate(x(ns), xdec(ns), Pi(nt), Pf(nt), i0(nt), i1(nt), lw(nt), xaux(ns),
d(ns, nt), p(nt))
  call system('rm out.ad')

  open(10, file='mutES_primaria_e_multiplas.ad', STATUS='UNKNOWN',
FORM='UNFORMATTED', ACCESS='DIRECT', RECL=4*ns)
  open(20, file='periodo.dat', STATUS='UNKNOWN', FORM='FORMATTED')
  open(30, file='out.ad', STATUS='UNKNOWN', FORM='UNFORMATTED',
ACCESS='DIRECT', RECL=4*ns)
  open(40, file='sint.ad', STATUS='UNKNOWN', FORM='UNFORMATTED',
ACCESS='DIRECT', RECL=4*ns)

  nevents=5
  dt=.004 ; v0=1500 ; dx=51 ; t0=.50 ; xmin=125 ; n=2
  call get_sint_mult(nevents, ns, nt, t0, xmin, v0, dx, dt, d)

  do j=1, nt
    write(40, rec=j)(d(i, j), i=1, ns)
  enddo

  do i=1, nt
    xi=xmin+(i-1)*dx
    i0(i)=sqrt((xi/v0)**2. + ((n-1)*t0)**2)/dt
    i1(i)=sqrt((xi/v0)**2. + (n*t0)**2)/dt
```

```

    pi(i)=i1(i)-i0(i)
write(*,*)pi(i)
enddo
!pause

pf(1)=93
pf(nt)=103
do j=2,nt-1
    call get_pipf(pi(1),pi(nt),j,nt,pi(j))
    call get_pipf(pf(1),pf(nt),j,nt,pf(j))
end do

write(*,*)

do j=1,nt
    p(j)=pf(j)+((pi(j)-pf(j))/2)
    write(*,*)" pf=",pf(j)," pi=",pi(j)," p=",p(j)
end do

!do j=1,nt
! xaux=0.0 ; xdec=0.0
! read(40,rec=j)(x(i),i=1,ns)
!     ind1=i0(j)-pi(j)*0.5 ! inicio da janela
!     ind2=i1(j)+pi(j)*0.5 ! fim da janela
! if(ind2.le.ns)then
!     Lw(j)=ind2-ind1      ! numero de amostras
!     ncf=pi(j)*perc
!     L=(1-perc*0.5)*pi(j)
!     write(*,*)' traco ',j,lw(j),ncf,L,ncf+L,pi(j),ind2
!     xaux(1:Lw(j))=x(ind1:ind1+Lw(j)-1)
!     call ldec_morf_porsani(ncf,L,lw(j),xaux,xdec(ind1))
! endif

do k=1,5
!     x(i0(j)+k)=1
!     x(i1(j)+k)=1
!     if(ind1.le.ns) x(ind1+k)=1.
!     if(ind2.le.ns) x(ind2+k)=1.
!     lw=pi(j)*2.

```

```

!      ik=lw+ i0(j) ; iend=pf(j)
!      xdec(ik+k)=1
!      xdec(iend+k)=1
      enddo

      write(30,rec=j)(xdec(i),i=1,ns)
      write(30,rec=nt+j)(x(i),i=1,ns)
! deallocate(h)
!end do

deallocate(x,xdec,pi,pf,i0,p)
close(10);close(20);close(30)
stop
end

```

```

subroutine get_pipf(p1,p2,j,Nt,p3)
      alf=(j-1)/float(nt-1)
      bet=(nt-j)/float(nt-1)
      p3=alf*p2+bet*p1

      return
      end

```

```

!
```

```

subroutine dec_adapt_trace(ns,x,pinicial,pfinal,ind2,y)
allocatable Lw(:),P(:),iaux(:),ydec(:)
allocate(lw(nt),iaux(ns),ydec(nt),p(nt))

do i=ind2+1,ns
      !Coleta emiaux Lw(i) amostras do sinal
      call ldec_morf_porsani(ncf(i),L(i),Lw(i),iaux,ydec)
      xdec(i)=ydec(lw(i))
enddo

      !Note que ncf(i), L(i), Lw(i) são calculados a partir do periodo P(i)
      !da multipla dentro da janela
deallocate(Lw,P,iaux,ydec)

```

```
return
end
```

```
subroutine get_sint_mult (nevents , ns , nt , t0 , offmin , vel , dx , dt , d)
```

```
!Gera familia de nt tracos com ns amostras com reflexao
!primaria mais nevents-1 multiplas.
!associadas a reflexão em uma camada plana horizontal
!nevents=@ de eventos (primaria + multiplas)
!ns - numero de amostras
!nt - numero de tracos
!t0 - tempo duplo da primaria em x=0
!offmin - offset minimo
!dx - espacamento entre estacoes receptoras
!dt - intervalo de amostragem
!d(ns,nt) - familia de nt tracos com ns amostras
! mjp - 24/03/2013 - porsani@cpgg.ufba.br
```

```
dimension d(ns,nt)
allocatable x(:)
allocate(x(nt))
cr=-0.7
do j=1,nt
    x(j)=offmin+(j-1)*dx
enddo

d=0.
do k=1,nevents
    do j=1,nt
        ik=sqrt((x(j)/vel)**2.0 + (k*t0)**2)/dt
        if(ik.le.ns)d(ik,j)=d(ik,j)+cr**(k-1)
    enddo
enddo

deallocate(x)
```

```

return
end

! pause
!
-----
      subroutine Ldec_adaptive_porsani(P0,Pf,perc,ns,x,xdec)
!
!P0= periodo inicial utilizado para a janela Lw nas posicoes (1, ... Lw)
!Pf= periodo final utilizado na interpolacao dos Pi para os intervalos 2,
!Lw - Larls gura da Janela (maior que Pi, ex Lw=Pi*1.5 ou P0*1.5)
!
!
!
!Milton J. Porsani 15 de junho de 2012
!
-----
dimension x(ns),xdec(ns)
allocatable h(:),xaux(:),d(:),zaux(:),z(:),c(:)

Lw=P0*2.0

      ncf=perc*P0

allocate( h(ncf),xaux(lw),d(Lw),zaux(lw+ncf),z(ns),c(ns))
!
-----
xdec=0.0; z=0.0 ;c=0.0 ; n1=0
do i=1,ns-lw+1
  xaux(1:lw)=x(i:lw+i-1)
  e0=dot_product(xaux,xaux)
!   write(*,*)p0,pf,i,lw,e0
  if(e0.ne.0.0) then
    n1=n1+1
    if(i.le.lw) then
      Pi=P0 ; ncf=perc*pi ; L=Pi - (perc*Pi)*0.5
    else
      alf=ns-i ; bet=i-lw
      w0=alf/(alf+bet) ; wf=bet/(alf+bet)
      pi=w0*p0+wf*pf
      ncf=perc*pi ; L=Pi - (perc*Pi)*0.5
    end if
  end if
end do

```

```

!           write(*,*)i,L
      endif
!           write(*,*)i,lw,l
if(lw-1.gt.2*ncf)then
      write(*,*)lw-1,2*ncf
      call Lpred_morf_porsani(ncf,L,lw,Xaux,h)
      call fold(ncf,h,lw,xaux,l1,zaux)
      d(1:L)=xaux(1:L)
      do k=L+1,lw
          d(k)=xaux(k)-zaux(k-L)
      enddo

      do k=ncf+L,lw
          z(i+k-1)=z(i+k-1)+d(k)
          c(i+k-1)=c(i+k-1)+1.
      enddo
endif
      endif
      enddo

      do i=1,ns
          if(c(i).ne.0.)xdec(i)=z(i)/c(i)
      enddo

deallocate(xaux,h,c,zaux,z,d)
return
end

      subroutine ldec_morf_porsani(n,L,m1,x,xdec)
!c*****
!c  porpose: generate the L prediction filter          *
!c  to predict y(i)=x(i+L) , i=1,..., m1-1          *
!c                                                    *
!c  input parameters: n - number of coeff. of the filter *
!c                    m1 - number of data samples      *
!c                    l - distancia de predicao        *
!c                    x - input trace (x(1) . . . x(m1)) *
!c                                                    *
!c  output parameters: h - h(1) . . . h(n) filter operator *

```

```

!c          Eh - sum of squared errors for filter operator *
!c work vectors: a(i), b(i), d(i), c(i)   i=1, . . . n      *
!c          cb(i)          i=1, . . . n+1                *
!c Milton J. Porsani   PPPG/UFBA 1986 (Tese de Doutorado) *
!c*****

dimension x(m1), xdec(m1)
real lambda, lambda1
  allocatable a(:), b(:), c(:), d(:), cb(:), y(:), h(:), zaux(:)
  m=m1-L

  allocate(a(n), b(n), c(n), d(n), cb(n+1), y(m), h(n), zaux(m1+n))
!c-----initialization
  m=m1-1
  do i=1,m
    y(i)=x(i+1)
  enddo
    cb(1) = 0.
    cb(2) = 0.
    cxy1 = 0.
    Eh = 0.
    do 1 i=2,m
      Eh = Eh + y(i)*y(i)
      cxy1 = cxy1 + x(i)*y(i)
      cb(1) = cb(1) + x(i)*x(i)
1      cb(2) = cb(2) + x(i)*x(i-1)
    if(n.eq.1) then
      h(1)=(cxy1 + x(1)*y(1))/(cb(1) + x(1)*x(1))
      Eh = Eh + y(1)*y(1) - h(1)*(cxy1+x(1)*y(1))
    return
  endif
    h(1) = -cxy1/cb(1)
    Eh = Eh + h(1)*cxy1
    r3 = cb(1) + x(1)*x(1) - x(m)*x(m)
    a(1) = 1.
    a(2) = -cb(2) /r3
    b(2) = -cb(2)/cb(1)
    b(1)= 1.
      Ea = cb(1) + a(2)*cb(2)

```

```

                Eb = r3 + b(2)*cb(2)
!      Ea=Ea*alb
!      Eb=Eb*alb
                c(1) = (x(m) + x(m-1)*a(2))/Ea
                d(1) = (x(1) + x(2)*b(2))/Eb
                r = x(m-1) + x(m)*b(2)
                e = x(2) + x(1)*a(2)
                c(2) = r/Eb
                d(2) = e/Ea
                f = x(2)*d(2) + x(1)*d(1)
                g = x(m)*c(1) + x(m-1)*c(2)
!c-----
do 2 j=2,n
j1 = j+1
                cxyj1 = 0.
                do 3 i=j,m
3      cxyj1 = cxyj1 + x(i-j+1)*y(i)
                Delth = cxyj1
do 4 i=1,j-1
4      Delth = Delth + h(i)*cb(j-i+1)
                sigma = -Delth/Eb
                Eh = Eh + sigma*Delth*b(1)
do 5 i=1,j-1
5      h(i) = h(i) + sigma*b(j1-i)
                h(j) = sigma*b(1)
if(j.eq.n)go to 999
                s = 0.
                z = 0.
do 6 i=1,j
6      s = s + d(i)*x(m-j+i)
                z = z + c(i)*x(j1-i)
alf1 = e/(1. - f)
beta1 = r/(1. - g)
varthel = z/(1. - f)
lambda1 = s/(1. - g)
do 7 i=1,j
7      a(i) = a(i) + alf1*d(j1 - i)
                b(i) = b(i) + beta1*c(j1 - i)
cb(j1) = 0.

```

```

do 8 i=j1,m
8   cb(j1) = cb(j1) + x(i)*x(i - j)
      do 9 i=2,j
        j2 = j1-i+1
9       cb(j2) = cb(j2)-x(m-i+2)*x(m-j+1)
        Delta = 0.
        do 10 i=1,j
10      Delta = Delta + a(i)*cb(j+2-i)
Deltb = b(1)*Delta/a(1)
beta = -Deltb/Ea
alfa = -Delta/Eb
Ea = Ea + alfa*Deltb
Eb = Eb + beta*Delta
      do 11 i=2,j
        ji = j-i+2
        save = a(i)
        a(i) = a(i) + alfa*b(ji)
11      b(ji) = b(ji) + beta*save
b(j1) = beta*a(1)
a(j1) = alfa*b(1)
e = a(j1)*x(1)
r = b(j1)*x(m)
u = y(j)
      do 12 i=1,j
        e = e + a(i)*x(j1-i+1)
        r = r + b(i)*x(m-j+i-1)
12      u = u + h(i)*x(j-i+1)
rho = u/(1. - f)
Eh = Eh -rho*u
      do 13 i=1,j
13      h(i) = h(i) + rho*d(j-i+1)
varthe = r/(b(1)*Eb)
lambda = e/(a(1)*Ea)
      do 14 i=1,j
        save = c(i)
        ji = j1 - i
        c(i) = c(i) + varthe1*d(ji) + varthe*b(ji+1)
14      d(ji) = d(ji) + lambda1*save + lambda*a(i+1)
c(j1) = varthe*b(1)

```

```

        d(j1) = lambda*a(1)
        f = f + lambda1*z + lambda*e
        g = g + varthe1*s + varthe*r
2       continue
999    continue

        do 15 i=1,n
15     h(i)=-h(i)

        call fold(n,h,m1,x,l1 ,zaux)
        xdec(1:L)=x(1:L)
        do k=L+1,m1
            xdec(k)=x(k)-zaux(k-L)
        enddo

        deallocate(a,b,c,d,cb,y,h,zaux)
        return
        end

        subroutine lpred_morf_porsani(n,L,m1,x,h)
!c*****
!c  porpose: generate the L prediction filter          *
!c    to predict  y(i)=x(i+L) , i=1,..., m1-l        *
!c                                                    *
!c  input parameters: n - number of coeff. of the filter *
!c                    m1 - number of data samples      *
!c                    l - distancia de predicacao     *
!c                    x - input trace (x(1) . . . x(m1)) *
!c                                                    *
!c  output parameters: h - h(1) . . . h(n) filter operator *
!c                    Eh - sum of squared errors for filter operator *
!c  work vectors: a(i), b(i), d(i), c(i)  i=1, . . . n      *
!c                    cb(i)  i=1, . . . n+1                *
!c  Milton J. Porsani  PPPG/UFBA 1986 (Tese de Doutorado) *
!c*****

        dimension x(m1),h(n)
        real lambda, lambda1

```

```

allocatable a(:),b(:),c(:),d(:),cb(:),y(:)
m=m1-L

allocate(a(n),b(n),c(n),d(n),cb(n+1),y(m))
!c-----initialization
m=m1-1
do i=1,m
  y(i)=x(i+1)
enddo
      cb(1) = 0.
      cb(2) = 0.
      cxy1 = 0.
      Eh = 0.
      do 1 i=2,m
        Eh = Eh + y(i)*y(i)
        cxy1 = cxy1 + x(i)*y(i)
        cb(1) = cb(1) + x(i)*x(i)
1      cb(2) = cb(2) + x(i)*x(i-1)
      if(n.eq.1) then
        h(1)=(cxy1 + x(1)*y(1))/(cb(1) + x(1)*x(1))
        Eh = Eh + y(1)*y(1) - h(1)*(cxy1+x(1)*y(1))
      return
    endif
      h(1) = -cxy1/cb(1)
      Eh = Eh + h(1)*cxy1
      r3 = cb(1) + x(1)*x(1) - x(m)*x(m)
      a(1) = 1.
      a(2) = -cb(2) /r3
      b(2) = -cb(2)/cb(1)
      b(1)= 1.
          Ea = cb(1) + a(2)*cb(2)
          Eb = r3 + b(2)*cb(2)
!      Ea=Ea*alb
!      Eb=Eb*alb
          c(1) = (x(m) + x(m-1)*a(2))/Ea
          d(1) = (x(1) + x(2)*b(2))/Eb
      r = x(m-1) + x(m)*b(2)
      e = x(2) + x(1)*a(2)
      c(2) = r/Eb

```

```

d(2) = e/Ea
f = x(2)*d(2) + x(1)*d(1)
g = x(m)*c(1) + x(m-1)*c(2)
!c-----
do 2 j=2,n
j1 = j+1
    cxyj1 = 0.
    do 3 i=j,m
3      cxyj1 = cxyj1 + x(i-j+1)*y(i)
      Delth = cxyj1
    do 4 i=1,j-1
4      Delth = Delth + h(i)*cb(j-i+1)
      sigma = -Delth/Eb
      Eh = Eh + sigma*Delth*b(1)
    do 5 i=1,j-1
5      h(i) = h(i) + sigma*b(j1-i)
      h(j) = sigma*b(1)
if(j.eq.n)go to 999
    s = 0.
    z = 0.
    do 6 i=1,j
6      s = s + d(i)*x(m-j+i)
      z = z + c(i)*x(j1-i)
alf1 = e/(1. - f)
beta1 = r/(1. - g)
varthel = z/(1. - f)
lambda1 = s/(1. - g)
    do 7 i=1,j
7      a(i) = a(i) + alf1*d(j1 - i)
      b(i) = b(i) + beta1*c(j1 - i)
    cb(j1) = 0.
    do 8 i=j1,m
8      cb(j1) = cb(j1) + x(i)*x(i - j)
      do 9 i=2,j
9      j2 = j1-i+1
      cb(j2) = cb(j2)-x(m-i+2)*x(m-j+1)
    Delta = 0.
    do 10 i=1,j
10     Delta = Delta + a(i)*cb(j+2-i)

```

```

Deltb = b(1)*Delta/a(1)
beta = -Deltb/Ea
alfa = -Delta/Eb
Ea = Ea + alfa*Deltb
Eb = Eb + beta*Delta
      do 11 i=2,j
      ji = j-i+2
      save = a(i)
      a(i) = a(i) + alfa*b(ji)
11      b(ji)= b(ji) + beta*save
b(j1) = beta*a(1)
a(j1) = alfa*b(1)
e = a(j1)*x(1)
r = b(j1)*x(m)
u = y(j)
      do 12 i=1,j
      e = e + a(i)*x(j1-i+1)
      r = r + b(i)*x(m-j+i-1)
12      u = u + h(i)*x(j-i+1)
rho = u/(1. - f)
Eh = Eh -rho*u
      do 13 i=1,j
13      h(i) = h(i) + rho*d(j-i+1)
varthe = r/(b(1)*Eb)
lambda = e/(a(1)*Ea)
      do 14 i=1,j
      save = c(i)
      ji = j1 - i
      c(i) = c(i) + varthe1*d(ji) + varthe*b(ji+1)
14      d(ji) = d(ji) + lambda1*save + lambda*a(i+1)
c(j1) = varthe*b(1)
d(j1) = lambda*a(1)
f = f + lambda1*z + lambda*e
g = g + varthe1*s + varthe*r
2      continue
999     continue

      do 15 i=1,n
15      h(i)=-h(i)

```

```
deallocate (a,b,c,d,cb,y)
return
end
```

```
SUBROUTINE FOLD(LA,A,LB,B,LC,C)
DIMENSION A(la),B(lb),c(*)
      lc=la+lb-1
      c(1:lc)=0.0
DO I=1,LA
DO J=1,LB
      K=I+J-1
      C(K)=A(I)*B(J)+C(K)
ENDDO
enddo
RETURN
END
```

Referências Bibliográficas

Backus, (1959) Water reverberations - their nature and elimination, *Geophysics*, **24** (2):233-261.

Berryhill, J. R. e Kim, Y. C. (1986) Deep-water peg legs and multiples: emulation and suppression, *Geophysics*, **51**(12):2177-2184.

Bunch, A. W. H. e White, R. E. (1985) Least-squares filters without transient errors: an examination of the errors in least-squares filter design, *Geophysical Prospecting*, **33**:657-673.

Cohen, J. K. e Stockwell, J. W. (2008) The new SU user's manual, SEG & GRI, quarta edição.

Cruz, Ricardo Felipe Chartuni Cabral da (2010) Atenuação da reflexão múltipla do fundo marinho utilizando a deconvolução preditiva adaptativa, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, Brasil.

Doicin, D. e Spitz, S. (1991) Multichannel extraction of water-botton peg-legs pertraining to high-amplitude reflection, *SEG Expanded Abstracts*, **10**:1439-1442.

Marple, S. L. (1980) A new autoregressive spectrum analysis algorithm, *IEEE Transactions Acoustics, Speech and Signal Processing*, **28**:441-454.

Mayne, W. H.(1962) Commom reflection point horizontal data stacking techniques, *Geophysics*, **27**(6):927-938.

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.

Montenegro, J. F. B. (1996) Deconvolução adaptativa da assinatura da fonte utilizando janelas de tempo deslizantes, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Morf, M.; Dickinson, B.; Kailath, T. e Vieira, A. (1977) Recursive solution of covariance equations for linear prediction, *IEEE Transactions Acoustics, Speech and Signal Processing*, **25**(12):429-433.

Oliveira, S. L. R. (2007) Atenuação de reflexões múltiplas de curto período utilizando filtragem adaptativa. Trabalho de graduação - Universidade Federal da Bahia. Salvador.

- Peacock, K. L. e Treitel, S. (1969) Predictive deconvolution: Theory and practice, *Geophysics*, **34**:155-169.
- Porsani, M. J. (1986) Desenvolvimento de algoritmos tipo- Levinson para o processamento de dados, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, Brasil.
- Porsani, M. J. (1992) Efficient solution of covariance equations with applications to seismic trace extrapolation and predictive deconvolution, *SEG Expanded Abstracts*, **11**:1191-1194.
- Porsani, M. J. e Ulrych, T. J. (1991) Levison-type extensions for non-toeplitz systems, *IEEE Transactions Acoustics, Speech and Signal Processing*, **39**:366-375.
- Porsani, M. J. e Ursin, B. (2007) Direct multichannel predictive deconvolution, *Geophysics*, **72**(2):H11-H27.
- Porsani, M. J. e Vetter, W. J. (1984) Na optimal formulation for (levinson) recursive design of-lagged minimum energy filters, *Proc. 54th Ann. Int. SEG Meeting*, pp. 604-606.
- Robinson, E. A. e Treitel, S. (1980) *Geophysical signal analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Schnider, W.a.; E. R. Prince. J. e Giles, B. F. (1965) A new data-processing technique for multiple attenuation exploiting differential normal moveout, *Geophysics*, **30**:348-362.
- Ulrych, T. J. e Clayton, R. W. (1976) Time series modeling and maximum entropy, *Phys. Earth Planet. Inst.*, pp. 188-200.
- Verschuur, D. J.; Berkout, A. J. e Wapenaar, C. P. A. (1992) Adaptive surface-related multiple elimination, *Geophysics*, **57**(9):1166-1177.
- Yilmaz, O. (2001) *Seismic data analysis: processing, inversion and interpretation of seismic data*, vol. 1 & 2, SEG, Tulsa-OK, USA, segunda edição.