



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

APLICAÇÃO DA DECONVOLUÇÃO
PREDITIVA MULTICANAL EM DADOS
SÍSMICOS DA BACIA DE CAMAMU-ALMADA

Vitor Eugênio Costa de Oliveira

SALVADOR – BAHIA

2021

Aplicação da deconvolução preditiva multicanal em dados sísmicos da Bacia de
Camamu-Almada

por

VITOR EUGÊNIO COSTA DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Michelângelo Gomes Silva

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

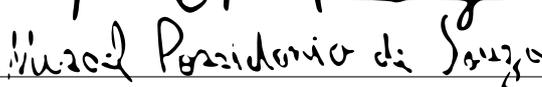
DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

COMISSÃO EXAMINADORA







Dr. Michelângelo Gomes da Silva

Me. Wilker Eduardo Souza

Me. Misael Possidonio de Souza

DATA DA APROVAÇÃO: 30/07/2021

Esse trabalho é dedicado ao meus pais -
Moisés e Gislaine - pilares de minha
pessoa. Quero lembrar também minha
tia-avó Lourdes e minha vó Maria Zidéia,
ambas de grande raça e bom coração.

Resumo

Na indústria do petróleo o processamento dos dados sísmicos é muito importante pois a partir de sua realização é obtida uma imagem representativa da subsuperfície. No presente trabalho é apresentado o processamento da linha sísmica marinha 0247-5519 pertencente à Bacia de Camamu-Almada. Os dados sísmicos foram adquiridos pela Petrobras em 1995 e permitiram um entendimento geológico, físico e matemático das bacias classificadas como de Margem Continental Passiva.

Nesse trabalho foi tratada a problemática das múltiplas de longo período que acometeram dados sísmicos de natureza marinha. É apresentada a origem desse ruído, seus tipos e suas principais características de acordo com a literatura existente. Também é feita uma breve descrição teórica sobre a deconvolução preditiva monocanal e multicanal.

A linha sísmica marinha processada foi pré-condicionada para aplicação da deconvolução preditiva multicanal, e os resultados obtidos comprovaram a efetividade do método para atenuação das múltiplas de longo período. Com o processamento sísmico realizado foi obtida uma seção sísmica que possui uma melhor razão sinal-ruído e boa resolução temporal.

Abstract

In the oil industry the processing of seismic data is very important because from its realization a representative image of the subsurface is obtained. In this work we present the seismic processing of the 0247-5519 offshore seismic line from the Camamu-Almada Basin. The seismic data were acquired by Petrobras in 1995 and they allowed a geological, physical and mathematical understanding of the basins classified as Passive Continental Margin.

In this work was treated the problem of long period multiples that affect marine seismic data. The origin of this noise is presented and its types and main characteristics according to the literature. In addition, a brief theoretical description of monochannel and multichannel predictive deconvolution methods is presented.

The processed marine seismic line was preconditioned for application of multichannel predictive deconvolution and the results obtained proved the effectiveness of the method for attenuation of long-period multiples. A seismic section with better signal-to-noise ratio and good temporal resolution was obtained after the seismic processing performed.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Resumo | 3 |
| Abstract | 4 |
| Introdução | 9 |
| 1 Aspectos sobre a geologia da Bacia de Camamu-Almada | 10 |
| 1.1 Localização | 10 |
| 1.2 Evolução tectônica-sedimentar | 10 |
| 1.3 Histórico exploratório | 11 |
| 2 Metodologia | 17 |
| 2.1 O evento denominado múltipla | 17 |
| 2.2 Deconvolução do pulso | 19 |
| 2.3 Deconvolução preditiva monocanal | 20 |
| 2.4 Deconvolução preditiva multicanal | 22 |
| 3 Aplicação e resultados | 24 |
| 3.1 Etapas do pré-processamento sísmico | 24 |
| 3.2 Etapas avançadas do processamento sísmico | 27 |
| 4 Conclusões | 37 |
| Agradecimentos | 39 |
| Referências | 40 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| 3.1 Principais parâmetros empregados na aquisição da linha sísmica de reflexão 0247-5519 da Bacia de Camamu-Almada. | 25 |
|---|----|

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Mapa de localização da Bacia Camamu-Almada | 11 |
| 1.2 | Seção Geológica da Bacia de Camamu - Almada | 12 |
| 1.3 | Carta estratigráfica da Bacia de Camamu | 13 |
| 1.4 | Carta Estratigráfica da Bacia de Almada | 14 |
| 1.5 | Épocas de maior exploração na Bacia C-A | 15 |
| 1.6 | Dados sísmicos 2 e 3d, poços e localização C-A | 15 |
| 1.7 | Localização exata em mapa da linha sísmica de reflexão marinha 0247-5519 | 16 |
| 2.1 | Ilustração da aquisição sísmica marinha | 18 |
| 2.2 | Múltipla quanto à superfície da lâmina d'água | 18 |
| 2.3 | Eventos <i>peg-legs</i> | 19 |
| 2.4 | Reverberações em camadas internas | 19 |
| 2.5 | Múltipla de longo período | 19 |
| 2.6 | Múltipla de curto período | 20 |
| 2.7 | Período, Distância de predição e Filtro | 21 |
| 3.1 | Fluxograma de processamento sísmico da linha sísmica 0247-5519. | 25 |
| 3.2 | Sismograma de tiro original em (a) com a onda direta presente e o sismograma após o mute em (b). | 26 |
| 3.3 | Sismograma do CMP 3000 e o espectro de velocidades com o ponto de coerência selecionado. | 28 |
| 3.4 | Sismograma CMP 3000 antes e após a correção MMO. | 28 |
| 3.5 | Seção sísmica empilhada obtida com os CMPs corrigidos de MMO. | 29 |
| 3.6 | Sismograma CMP 4070 com correção MMO em (a), sismograma obtido após a deconvolução com 3 canais em (b), 5 canais em (c) e 7 canais em (d). | 31 |
| 3.7 | Seção sísmica empilhada após correção MMO e aplicação da deconvolução. | 33 |
| 3.8 | Campo de velocidades final da linha sísmica 0247-5519. | 34 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.9 | Seção sísmica empilhada final. | 35 |
| 3.10 | Seção sísmica migrada. | 36 |

Introdução

O processamento sísmico tem como principal objetivo tratar os dados obtidos de campo a fim de gerar uma imagem final o mais condizente possível com a realidade geológica da subsuperfície. Obviamente, todos os dados sísmicos obtidos apresentam certo grau de erro ou ruído. As etapas do processamento dos dados são aplicadas para melhorar a razão sinal-ruído, e conseqüentemente, a geração de seções sísmicas mais realistas e apropriadas para visualização das estruturas geológicas e determinação de alvos promissores para exploração.

O método de deconvolução está presente em fluxogramas de processamento de dados sísmicos marinho e tem por objetivos a melhoria da resolução temporal pela forma do pulso e a remoção dos eventos, denominados de reverberações ou múltiplas (Robinson e Treitel, 1980; Yilmaz, 2001). Na deconvolução preditiva são estimados os coeficientes do filtro de erro de predição que irá remover a parte predizível dos dados de entrada e dessa forma dá origem ao traço filtrado.

Normalmente, na deconvolução preditiva a função de autocorrelação dos dados é usada para formar as equações normais que são resolvidas através do uso da recursão de Levinson. Os passos do algoritmo do método de deconvolução preditiva multicanal é semelhante aos da deconvolução preditiva monocanal, a diferença é que os escalares passam a ser matrizes (Porsani e Ursin, 2007).

O presente trabalho teve por objetivos: realizar o processamento sísmico dos dados da linha sísmica 0247-5519 e por meio da deconvolução preditiva multicanal (DPM) atenuar as múltiplas de longo período associadas às reflexões primárias ocorridas no assoalho oceânico. O trabalho, está dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo, são abordados aspectos gerais sobre a geologia da Bacia Camamu-Almada e um resumo histórico do movimento exploratório na bacia. O capítulo dois, trata basicamente da descrição teórica do método de deconvolução preditiva multicanal e no capítulo três são apresentadas as etapas do fluxograma de processamento executado e os resultados obtidos com o uso da deconvolução e a seção sísmica produzida. Por fim, são apresentadas as conclusões do trabalho.

Capítulo 1

Aspectos sobre a geologia da Bacia de Camamu-Almada

Nesse capítulo trazemos algumas informações relevantes a respeito da geologia da Bacia de Camamu-Almada e um breve histórico do processo exploratório dessa bacia *offshore* brasileira.

1.1 Localização

A Bacia de Camamu-Almada está situada no nordeste brasileiro entre os paralelos 13° e 14° 15" Sul e meridianos 35° 30' e 39° Oeste. Tal área é limitada, ao norte, pela Bacia do Recôncavo - na falha da barra - e pelo sistema de falhas de Itapuã. Ao sul, limita-se com a Bacia do Jequitinhonha pelo embasamento Alto de Olivença. O limite oeste ocorre no litoral, onde o embasamento Proterozóico aflora. Como dimensões apresenta 125 km Norte-Sul e 30 km Oeste-Leste. A Bacia C-A apresenta cota batimétrica máxima de 3000 metros ao leste e da totalidade de sua área, 16.500 km² pertencem à Camamu e 6400 km² à Almada (Araujo, 2007). Os limites da bacia estudada estão evidenciados na figura (1.1).

1.2 Evolução tectônica-sedimentar

A Bacia de Camamu - Almada tem sua gênese compartilhada com as demais bacias mezo-cenozóicas da margem brasileira. Tal processo se deu com o fracionamento do super continente de Gondwana e abertura do Oceano Atlântico (Gonçalves, 2001). Possui evolução tectônica-sedimentar atrelada à três eventos: **pré-rifte**, **sin-rifte** e **pós-rifte**.

O pré-rifte ocorreu do período Jurássico ao Neocomiano inferior, onde houve sinéclise intra-continental, estirando e afinando a crosta. Neste cenário, foram criadas as Formações Aliança, Sergi e Itaípe. Tais

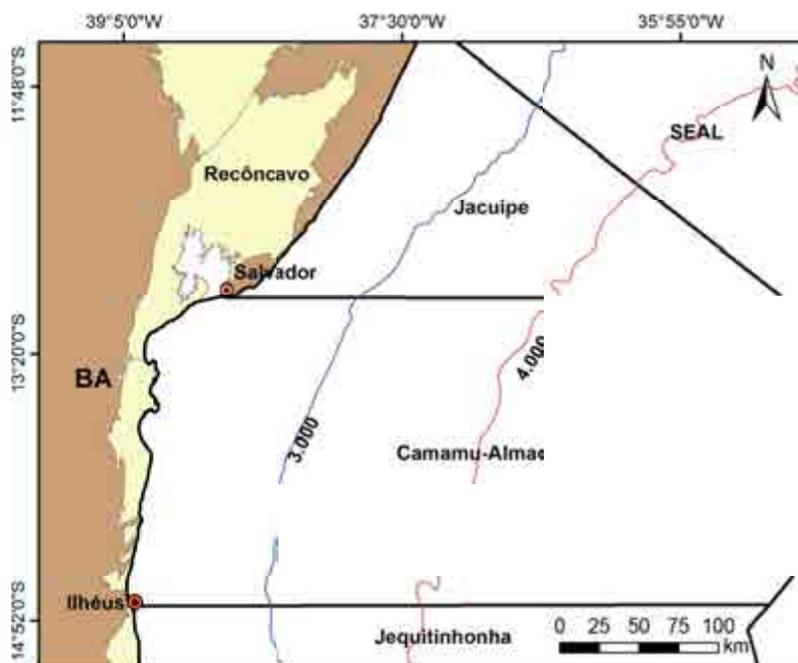


Figura 1.1: Mapa de localização da Bacia Camamu-Almada
(Santos e Vasconcellos, 2019)

deposições apresentam alternâncias de pacotes arenosos e folhelhos lacustrinos.

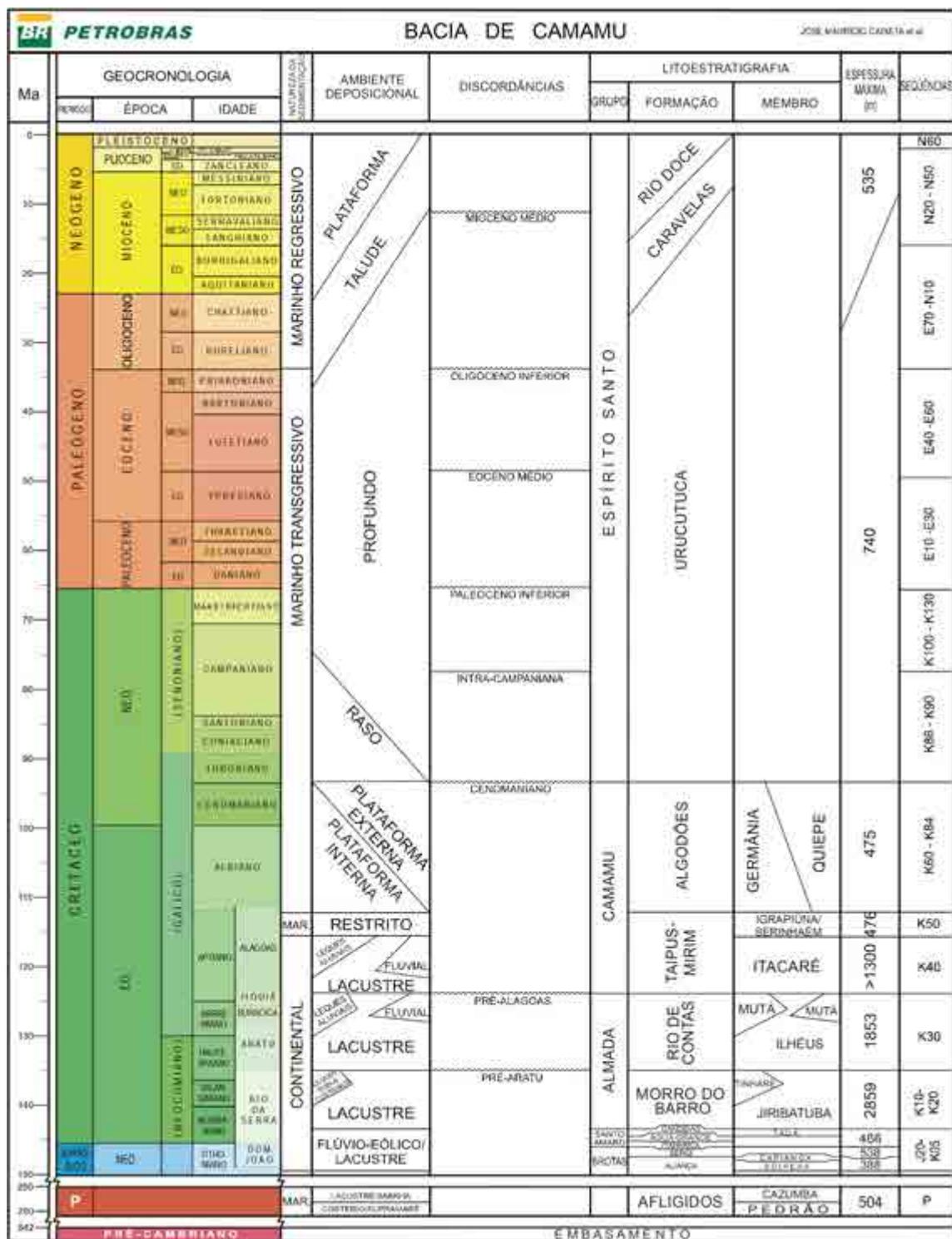
O sin-rifte se desenvolveu do Neocomiano ao Aptiano. Nesta época aconteceu intensa atividade tectônica distensiva, logo ampla quebra no supercontinente Gondwana. Aqui, foram originadas as Formações Morro do Barro e Rio de Contas. Também houve deposição de clastos grosseiros, conglomerados e arenitos flúvio-aluvionares, além de algum vulcanismo na porção sul (Chang, Kowsmann, Figueiredo e Bender, 1992), sem contar o desenvolvimento de margens carbonáticas lacustres e depósitos evaporíticos.

No pós-rifte houve o nascimento das Formações Taipus-Mirim, Algodões, Urucutuca, Caravelas, Rio Doce e Barreitas. Nesta fase ocorreu a deposição de carbonatos albianos intercalados por depósitos aluvionares deltaicos, erodidos no período Santoniano-Coniaciano e seguido do predomínio marinho transgressivo e regressivo (Araujo, 2007). Como componentes geomorfológicos desta margem passiva, podemos citar: plataforma continental - à oeste, região de talude e planície abissal.

Na ilustração da figura (1.2) temos uma boa representação da Seção geológica C-A, seguido das Cartas Estratigráficas nas imagens das figuras (1.3) e (1.4), respectivamente.

1.3 Histórico exploratório

A exploração na Bacia de Camamu - Almada começou no ano de 1922 com a perfuração do poço estratigráfico 2-SGMB-0033-BA próximo ao município de Camamu. Houveram quatro períodos de alta intensidade investigativa e exploratória, figura (1.5). Estas épocas foram: De 1959 a 1966 - onde predominou a explo-



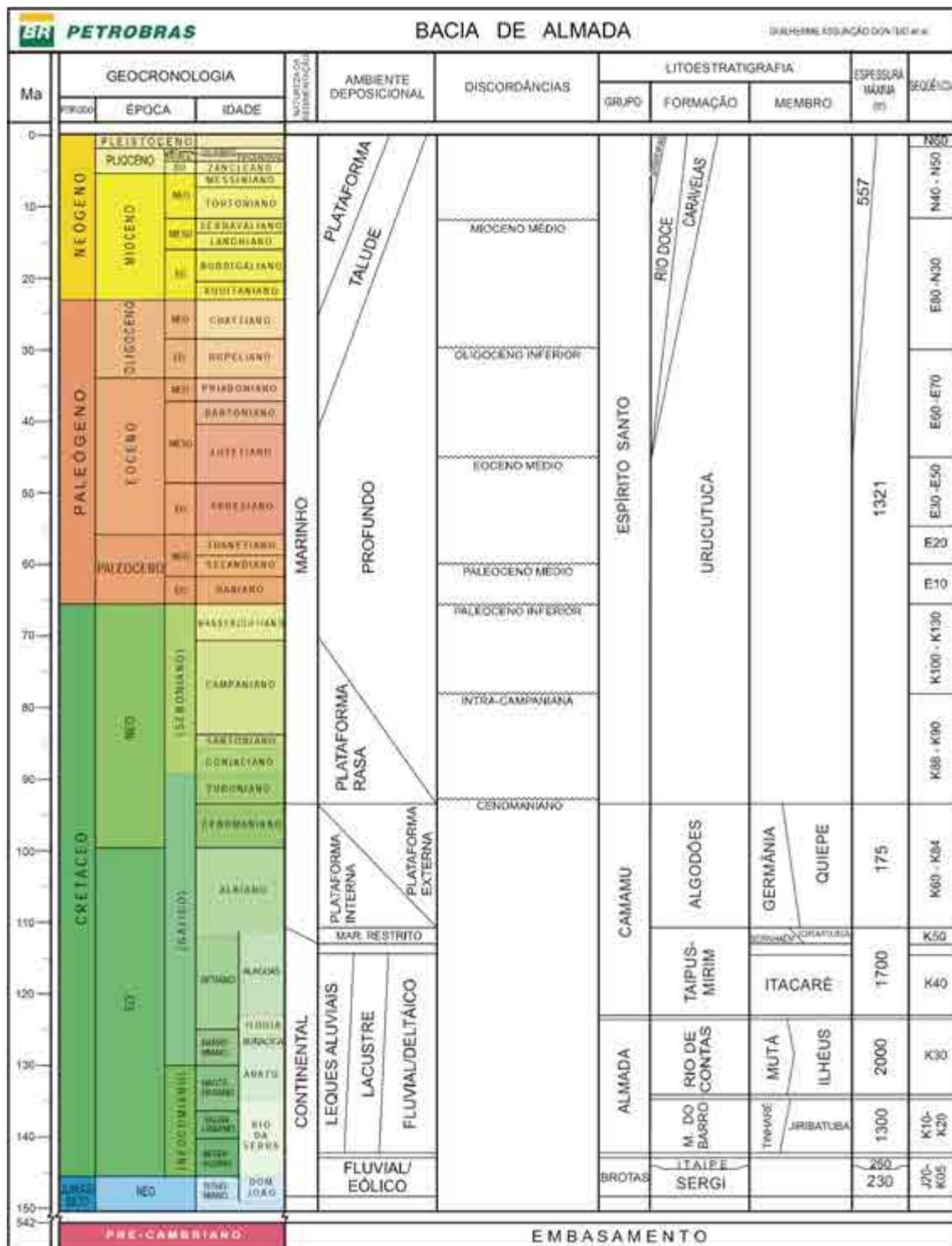


Figura 1.4: Carta Estratigráfica da Bacia de Almadá (Valente e Ferreira, 2019)

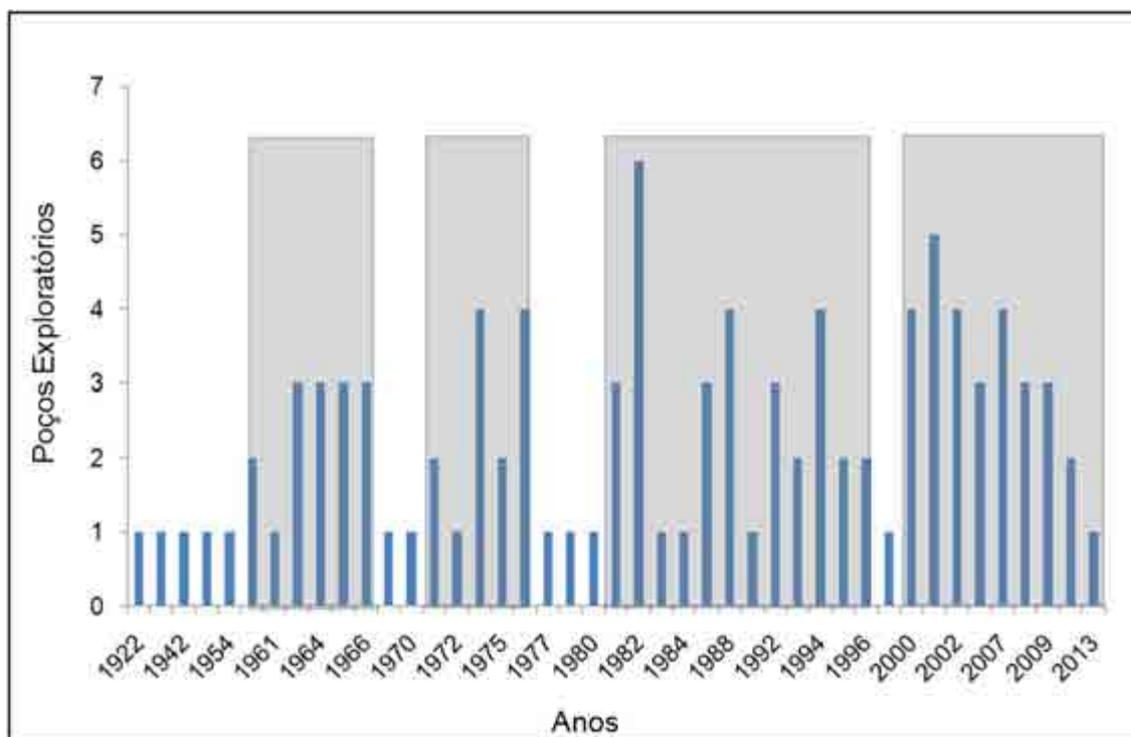


Figura 1.5: Épocas de maior exploração na Bacia C-A

(Valente e Ferreira, 2019)

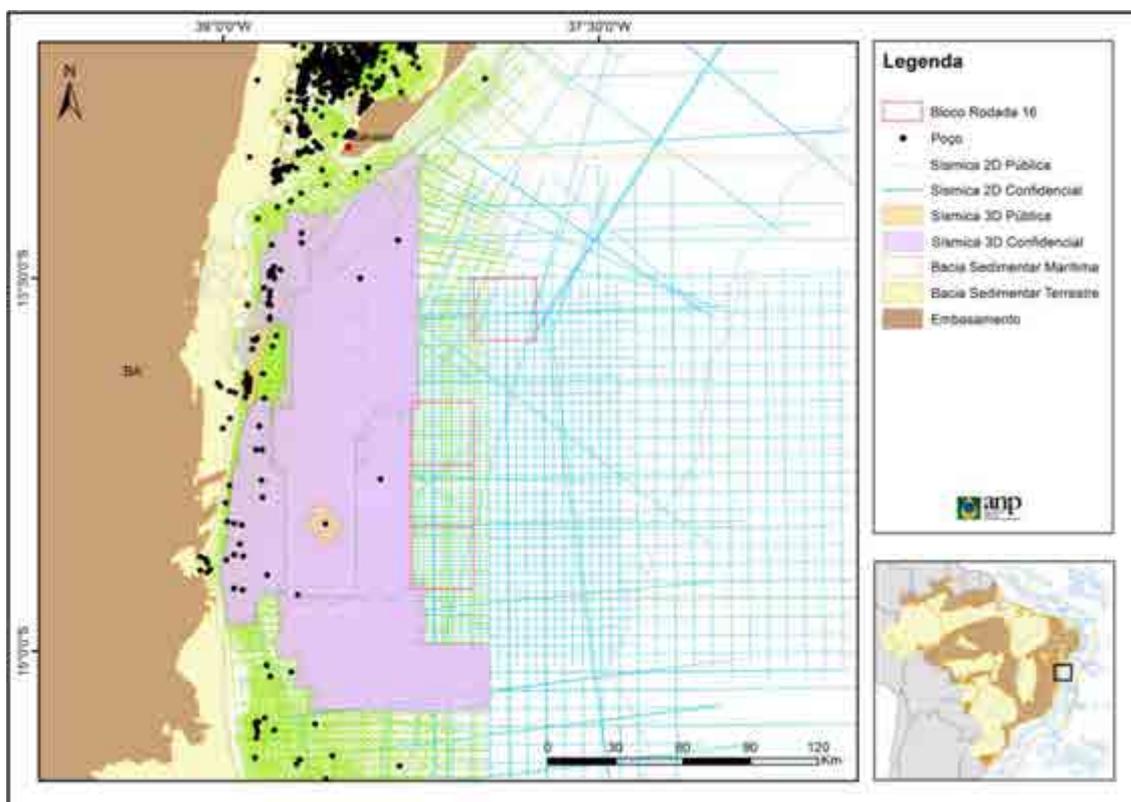


Figura 1.6: Dados sísmicos 2 e 3d, poços e localização C-A

(Valente e Ferreira, 2019)

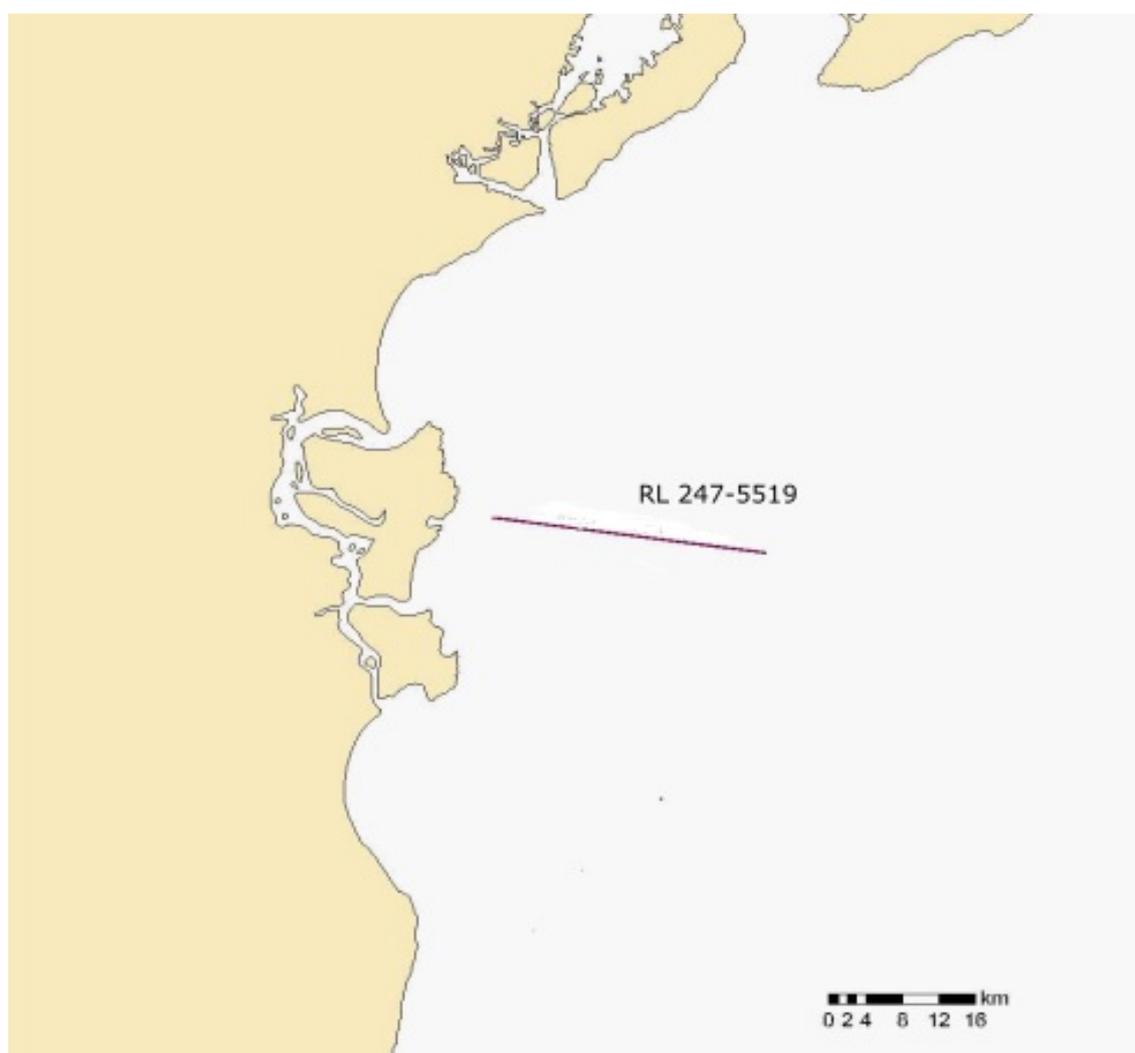


Figura 1.7: Localização exata em mapa da linha sísmica de reflexão marinha 0247-5519

(Torres, 2008)

Capítulo 2

Metodologia

Esse capítulo contém a metodologia empregada para filtragem dos dados sísmicos, bem como, aspectos fundamentais acerca do ruído sísmico, denominado de múltiplas e do método de deconvolução preditiva multicanal utilizada.

2.1 O evento denominado múltipla

A sísmica de reflexão marinha é feita com a utilização de fonte(s) e receptores posicionados numa certa cota ao mar, tracionados por um navio de reboque. Daqui, é esperado que parte da energia enviada à subsuperfície, mesmo que atenuada por divergência esférica e absorção, retorne aos hidrofones para geração da imagem.

O onda passará por meios de densidades distintas, logo velocidades diferentes. Ao produto destas duas grandezas físicas damos o nome de Impedância.

$$I = \rho.v \quad (2.1)$$

De posse da equação anterior, o coeficiente de reflexão - quantidade energética que passará ou refletirá entre litotipos, será definido por:

$$R = \frac{v1\rho1 - v2\rho2}{v1.\rho1 + v2\rho2} \quad (2.2)$$

Quando a energia sísmica fica trapeada entre meio adversos, pode ocorrer reverberação. Tal efeito, quando captado pelos hidrofones aparecem na seção sísmica deslocados de um certo tempo, criando fantasmas ou reflexões secundárias - *Múltiplas*. A literatura indica existência de vários tipos e associações destes eventos. Como exemplo, podemos citar reflexões que ocorrem no contato lâmina d'água/ar, ver figura (2.2), as quais provocam reverberações de n ordem ou até mesmo eventos denominados "*peg-legs*", ver figura (2.3). Há

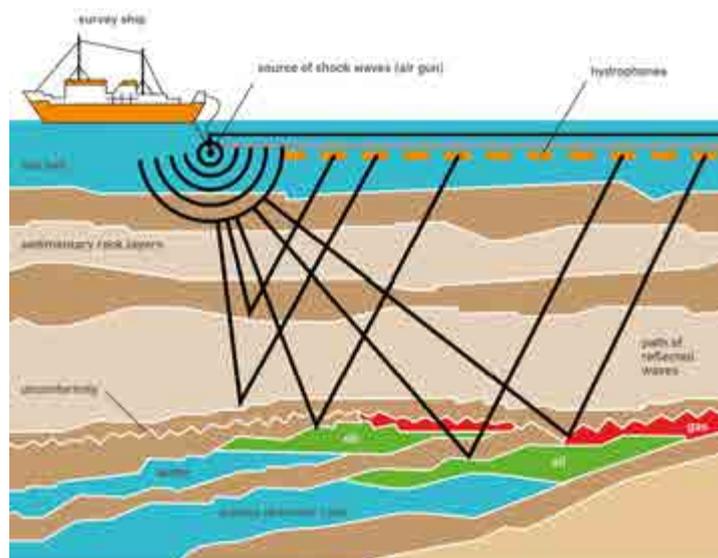


Figura 2.1: Ilustração da aquisição sísmica marinha
(Kukreja, Louboutin, Lange, Luporini e Gorman, 2017)

também aqueles relacionados a alguma reverberação dentro de uma camada litológica, como na ilustração da figura (2.4), além de eventos periódicos longos e curtos, figuras (2.5) e (2.6), respectivamente.

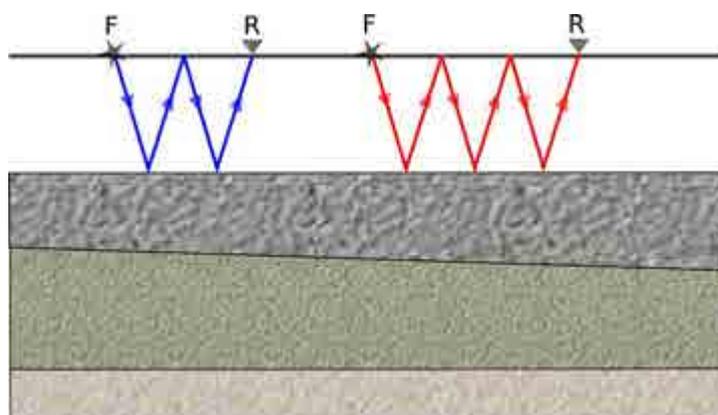


Figura 2.2: Múltipla quanto à superfície da lâmina d'água

As múltiplas camuflam reflexões primárias, criam fantasmas ou refletores onde não existem e, na literatura podem aparecer por saltos laterais e verticais - além de poderem ser simétricas ou assimétricas (Verschuur, 2013). Dado os variados tipos deste evento, faz-se necessária a combinação de dois ou mais métodos para sua supressão.

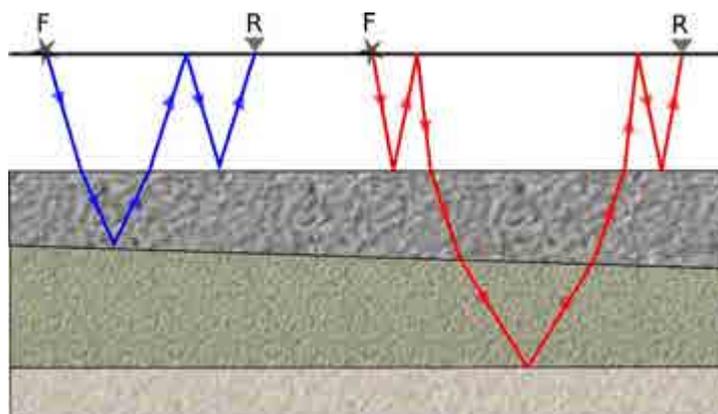


Figura 2.3: Eventos *peg-legs*

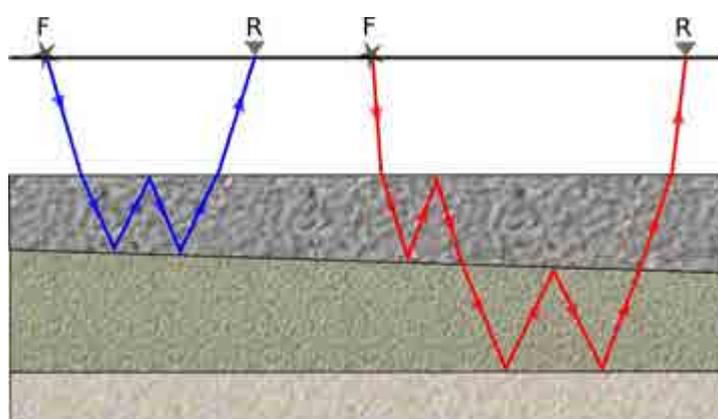


Figura 2.4: Reverberações em camadas internas

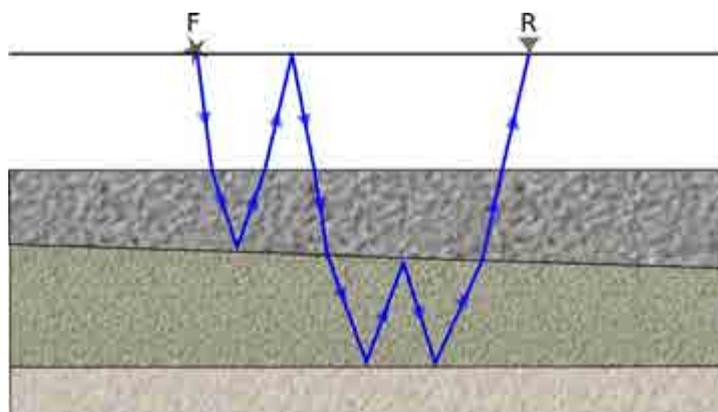


Figura 2.5: Múltipla de longo período

2.2 Deconvolução do pulso

Idealmente, a deconvolução comprime as componentes do pulso (*wavelet*) para um *spike* - Delta de Dirac aumentando a resolução temporal e restituindo a resposta impulsiva da terra. Como suposições devemos levar em conta que a subsuperfície é dividida em camadas horizontais com velocidade constante e que a onda

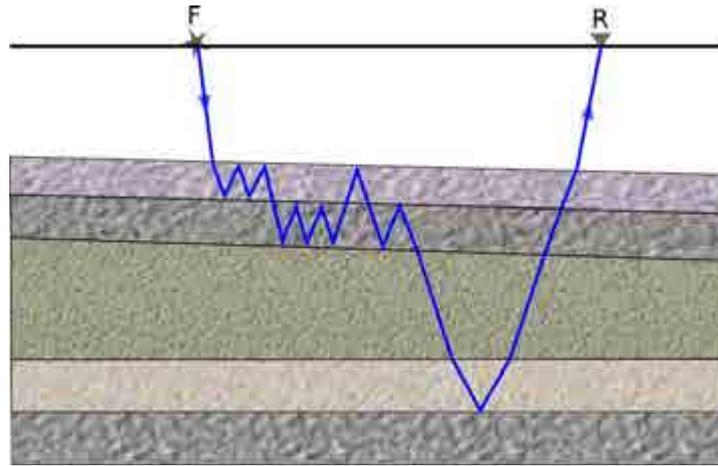


Figura 2.6: Múltipla de curto período

incide normalmente.

O modelo convolucional matemático do traço sísmico marinho sem ruído ambiental pode ser representado pela seguinte equação:

$$x(t) = p(t) * e(t) * m(t), \quad (2.3)$$

onde $x(t)$ compreende o traço sísmico, $e(t)$ a impulsividade da subsuperfície e $m(t)$ o trem de reverberação na lâmina d'água (Yilmaz, 2001).

A ideia aqui é obter um operador que quando convolvido com o pulso, o transforme numa delta. Portanto, aplicando o operador $p^{-1}(t)$ em ambos lados da equação (2.3), temos:

$$p^{-1}(t) * x(t) = p^{-1}(t) * p(t) * e(t) * m(t) \quad (2.4)$$

$$\tilde{x}(t) = e(t) * m(t). \quad (2.5)$$

De acordo com a equação (2.5) observa-se que no caso marinho a convolução do pulso não elimina o trem de múltiplas. É necessário enfatizar que o método de deconvolução é tido como um processo **determinístico** quando há conhecimento do pulso, sendo o cálculo do filtro inverso obtido de maneira trivial.

2.3 Deconvolução preditiva monocanal

Conceitualmente, a deconvolução preditiva se utiliza das informações em tempos anteriores para prever e atenuar amplitudes póstumas repetidas - reflexões secundárias (Lima, 1999). Aqui, há a obtenção de um filtro preditivo convencionado $h(t)$, com certo número de coeficientes e que atuará em amostras imediatamente

após a distância de predição L , ver figura (2.7). Este processo é **estatístico** e pode ser obtido com base no Método dos Mínimos Quadrados (*MMQ*).

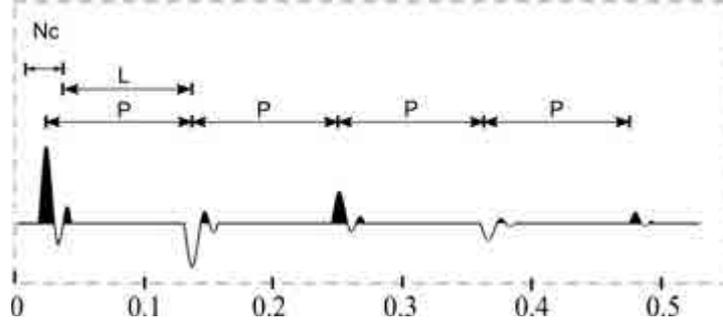


Figura 2.7: Período, Distância de predição e Filtro

Um sinal predito de $\tilde{x}(t)$ pode ser obtido pela equação:

$$\tilde{x}_{t+L} = \sum_{k=1}^N x_{t-k+1} \tilde{h}_k \quad (2.6)$$

Haverá um diferença entre o sinal desejado x_{t+L} e o calculado \tilde{x}_{t+L} , constituindo um erro.

$$e_{t+L} = x_{t+L} - \tilde{x}_{t+L} \quad (2.7)$$

Daqui, substituindo a equação (2.6) na equação (2.7), teremos:

$$e_{t+L} = x_{t+L} - \sum_{k=1}^N x_{t-k+1} \tilde{h}_k \quad (2.8)$$

Matricialmente, este erro se traduz da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ \vdots \\ e_{t+2} \\ \vdots \\ e_{M+3} \\ e_{M+4} \\ e_{M+5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 0 & 0 \\ x_3 & x_0 & 0 & 0 \\ x_4 & x_1 & x_0 & 0 \\ x_5 & x_2 & x_1 & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{t+2} & x_t & x_{t-1} & x_{t-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M+3} & x_M & x_{M-1} & x_{M-2} \\ 0 & 0 & x_M & x_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -h_1 \\ -h_2 \\ -h_3 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

A matriz à esquerda traduz o vetor dos erros de predição. A matriz central é composta pelo traços sísmicos deslocados de três unidades ($L = 3$) e a última matriz é formada por um filtro de três coeficientes ($nc = 3$) (Enzila, 2018). Da teoria do método (MMQ), a soma dos erros quadrados deve ser mínima. Isso significa que a solução do problema pode ser obtida derivando-se $Q(h) = e^T e$ e igualando-se a zero, ou seja:

$$\frac{\partial Q(\mathbf{h})}{\partial \mathbf{h}} = 0 \quad (2.10)$$

Assim, decorre:

$$\begin{bmatrix} r_0 & \cdots & r_{N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N-1} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_L \\ \vdots \\ r_{L+N-1} \end{bmatrix}; \quad (2.11)$$

A matriz r_{ij} é denominada matriz de autocorrelação Toeplitz - sua propriedade é de bandejamento com relação à diagonal principal, além de ser simétrica. O conceito de autocorrelação é importante pois visualmente resalta a energia das múltiplas e ajuda na sua localização, afim de delimitar com mais facilidade onde o filtro irá trabalhar, o termo $[r_L \cdots r_{L+N-1}]^T$ é a correlação cruzada entre os traços desejado e sísmico. Por fim, o vetor \mathbf{h} é o filtro de Wiener-Levinson, o qual se deseja obter.

2.4 Deconvolução preditiva multicanal

A aquisição sísmica marinha ocorre com a captação do sinal em múltiplos receptores. Justifica-se então a utilização de um filtro Wiener-Levinson que atuará em mais linhas simultaneamente de forma a otimizar o processamento. Tal filtro multicanal irá, além de salvar dados das reflexões primárias para predição, atuar com uso da coerência lateral inter-traços (Souza, 2018).

Para um filtro de dois canais, podemos definir o traço predito como:

$$\tilde{z}(t) = x(t) * \tilde{h}(t) + y(t) * \tilde{f}(t), \quad (2.12)$$

Note que aqui, o novo traço é fruto da soma de duas convoluções. Numa forma mais geral, teríamos:

$$\tilde{z}_{t+L} = \sum_{k=1}^N x_{t-k+1} \tilde{h}_k + \sum_{k=1}^N y_{t-k+1} \tilde{f}_k \quad (2.13)$$

No presente trabalho, o número de canais ideal para a deconvolução foi 5. Para calcular o erro utilizamos a mesma tática - traço desejado menos calculado, portanto:

$$e_t = z_t - \tilde{z} = z_t - \tilde{h}(t) * x(t) - \tilde{f}(t) * y(t) \quad (2.14)$$

E assim, matricialmente:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_0 & x_0 & y_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_1 & x_1 & y_1 & x_0 & y_0 & 0 & 0 \\ z_2 & x_2 & y_2 & x_1 & y_1 & x_0 & y_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_M & x_M & y_M & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{M+1} & 0 & 0 & x_M & y_M & \vdots & \vdots \\ z_{M+2} & 0 & 0 & 0 & 0 & x_M & y_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\tilde{h}_1 \\ -\tilde{f}_1 \\ -\tilde{h}_2 \\ -\tilde{f}_2 \\ -\tilde{h}_3 \\ -\tilde{f}_3 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Daqui, pode-se aplicar o mesmo fluxo matemático dado no tópico monocanal recaindo no sistema ampliado:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}^T \mathbf{z} & \mathbf{z}^T \mathbf{W}_0 & \mathbf{z}^T \mathbf{W}_1 & \cdots & \mathbf{z}^T \mathbf{W}_{N-1} \\ \mathbf{W}_0^T \mathbf{z} & \mathbf{R}_0 & \mathbf{R}_{-1} & \cdots & \mathbf{R}_{-(N-1)} \\ \mathbf{W}_1^T & \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{R}_{-1} \\ \mathbf{W}_{N-1}^T \mathbf{z} & \mathbf{R}_{N-1} & \cdots & \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{c}_{N1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{cN} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Contudo, os elementos da matriz de autocorrelação Toeplitz são também matrizes. Além disso, cada coeficiente do filtro será um vetor que comporta de forma oculta \tilde{h}_1, \tilde{h}_2 até \tilde{h}_n . Considerações feitas, pode-se utilizar da Recursão de Levinson multicanal para determinação dos filtros de ordem crescentes. (Lima, Porsani, Maciel e Silva, 2007).

Capítulo 3

Aplicação e resultados

Neste capítulo é apresentado o fluxograma de processamento realizado para atenuação das múltiplas de primeira ordem da linha sísmica 0247-5519 da Bacia de Camamu-Almada, ilustrando os resultados obtidos nas etapas realizadas. São apresentadas as fases do pré-condicionamento dos dados sísmicos e a aplicação do método de deconvolução preditiva multicanal, bem como, os resultados da filtragem. Também é apresentada a seção sísmica final obtida.

3.1 Etapas do pré-processamento sísmico

No presente trabalho, foi definido um fluxograma de processamento sísmico para atenuação das reflexões múltiplas por meio da deconvolução preditiva multicanal da linha sísmica 0247-5519.

A figura (3.1) ilustra o fluxograma contendo todas as etapas do pré-processamento (na cor vermelha) e processamento avançado (nas cores azul e amarelo) que foram empregadas. Destacamos que as etapas utilizadas para preparação ou pré-condicionamento dos dados e a aplicação da deconvolução preditiva multicanal estão destacadas na cor azul no fluxograma.

Na primeira etapa do fluxograma de processamento foi realizada a leitura do dados sísmicos de campo a conversão do arquivo no formato padrão SEG-Y, com extensão **.SGY**, para um formato compatível com o software de processamento *Seismic Unix* que foi adotado nesse trabalho, ou seja, um arquivo com extensão **.SU**.

Após a conversão do arquivo, foram feitas consultas ao relatório de campo do observador com o objetivo de coletar os parâmetros usados na aquisição dos dados sísmicos. Os principais parâmetros podem ser vistos na tabela (3.1). De posse dos valores referentes ao arranjo de aquisição ou lanço, número de tiros e receptores, grau de cobertura bem como das distâncias entre hidrofones e fontes montou-se a chamada etapa de geometria, a qual consiste basicamente, na definição das coordenadas de fontes e receptores para cada

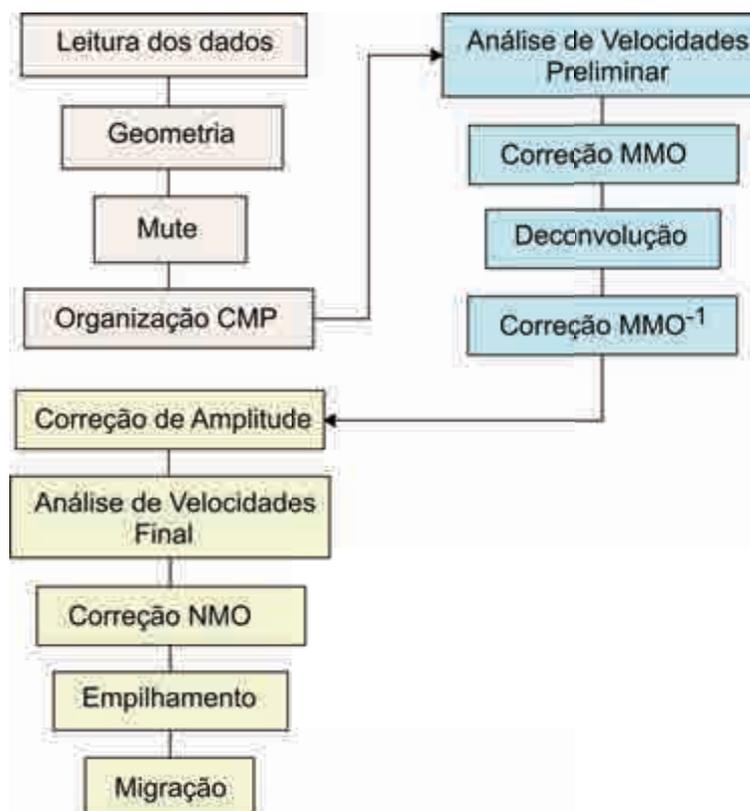


Figura 3.1: Fluxograma de processamento sísmico da linha sísmica 0247-5519.

traço sísmico e no cálculo das famílias de ponto médio comum (CMP) e dos afastamento (*offsets*) entre os diferentes pares de fonte e receptor. Importante salientar que essas informações da geometria são registradas no cabeçalho ou *header* do arquivo SU.

| DESCRIÇÃO | PARÂMETRO |
|---------------------------------|-----------|
| Arranjo | End-on |
| Número de tiros | 1098 |
| Número de receptores | 240 |
| Tempo de registro | 4.5 s |
| Razão de amostragem | 4 ms |
| Distância entre hidrofones | 13.33 m |
| Distância entre pontos de tiros | 26.66 m |
| Grau de cobertura | 60 |

Tabela 3.1: Principais parâmetros empregados na aquisição da linha sísmica de reflexão 0247-5519 da Bacia de Camamu-Almada.

A etapa de silenciamento ou mute foi realizada após a montagem da geometria dos dados, com o objetivo

de retirar dos sismogramas de tiro os ruídos do início dos traços sísmicos e a contribuição ou energia dos eventos da onda direta. Para silenciar os traços foi definida para cada sismograma de tiro uma fronteira ou limite de tempo localizado logo abaixo do evento da onda direta, de forma que para os tempos inferiores a essa fronteira as amplitudes passam a ter valor zero.

Na figura (3.2) é apresentado o sismograma de tiro antes e após a aplicação da função mute. É possível verificar na figura que os ruídos aleatórios no início dos traços e a onda direta foram totalmente eliminados do sismograma. O mute foi realizado com o uso do software comercial de processamento *SeisSpace* disponível no CPGG-UFBA.



Figura 3.2: Sismograma de tiro original em (a) com a onda direta presente e o sismograma após o mute em (b).

O método de deconvolução preditiva pode ser aplicado aos dados organizados em famílias de afastamento comum ou em famílias de ponto médio comum (CMP). Portanto, Foi feita a reorganização dos traços sísmicos após o mute, de forma que foram geradas as famílias CMPs. Um evento de reflexão no domínio CMP representa a iluminação de um mesmo ponto do refletor na subsuperfície por diferentes pares de fonte e receptor, o que melhora a razão sinal ruído dos dados sísmicos de reflexão.

3.2 Etapas avançadas do processamento sísmico

Com os dados sísmicos organizados em CMPs, iniciamos as fases de pré-condicionamento dos dados sísmicos para aplicação do método de deconvolução. O pré-condicionamento pode ser dividido em duas fases, a primeira é a realização de uma análise de velocidades preliminar para determinação das velocidades das reflexões primárias ocorridas no assoalho oceânico e dos períodos associados a esse evento.

A velocidade da múltipla é aproximadamente igual a velocidade da reflexão primária. A segunda fase é a correção MMO (*multiple moveout correction*) nas famílias CMPs em que as reflexões primárias do fundo oceânico e as suas múltiplas associadas são horizontalizadas. Para fazer a correção MMO são utilizados os tempos e velocidades selecionadas na análise de velocidades preliminar. Uma boa estimativa de velocidade para correção MMO seria a velocidade da reflexão primária ocorrida no fundo do mar.

A linha sísmica 0247-5519 possui 2401 famílias CMPs com máxima cobertura de 60 traços, para realizar a análise de velocidades preliminar, usou-se uma amostragem de 101 CMPs, ou seja, o primeiro CMP analisado foi o de número 1990, o segundo 2090 até o último o CMP número 4390.

A figura (3.3) ilustra a análise de velocidades da família CMP 3000 da linha sísmica processada e o espectro de velocidades gerado para selecionar ou marcar ponto de coerência (*pick*) relacionado ao evento da reflexão primária. É possível verificar o ponto de coerência (ponto na cor preta) selecionado no espectro de velocidades do CMP 3000. Esse ponto define o tempo de registro da primária de 1.1 segundos e a velocidade de 1550 m/s que serão utilizados na segunda fase do pré-condicionamento.

A correção MMO do sismograma do CMP 3000 é apresentado na figura (3.4b). Nessa figura, pode ser observado um perfeita horizontalização da reflexão primária e da múltipla relacionada no tempo de 2.2 segundos aproximadamente. Esse fato, demonstra que a velocidade e o tempo determinado na análise de velocidades foram bastante precisos.

É possível verificar na figura (3.4b) que a correção MMO torna a periodicidade adequada dos eventos das múltiplas na família CMP, esse resultado é bastante interessante pois favorece bastante a aplicação do método de deconvolução preditiva, uma vez que, pode ser usada a distância de predição "L" em todos os afastamentos do CMP.

A figura (3.5) ilustra a seção empilhada gerada com as famílias CMPs corrigidas de MMO usando-se as velocidades definidas na etapa da análise de velocidades preliminar. Nessa figura pode ser claramente verificada a presença da múltipla do fundo oceânico ou múltipla de longo período da reflexão primária.

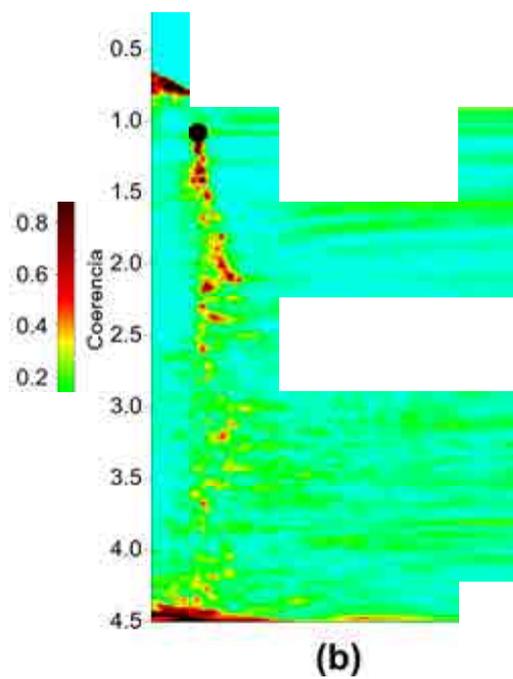


Figura 3.3: Sismograma do CMP 3000 e o espectro de velocidades com o ponto de coerência selecionado.

Figura 3.4: Sismograma CMP 3000 antes e após a correção MMO.

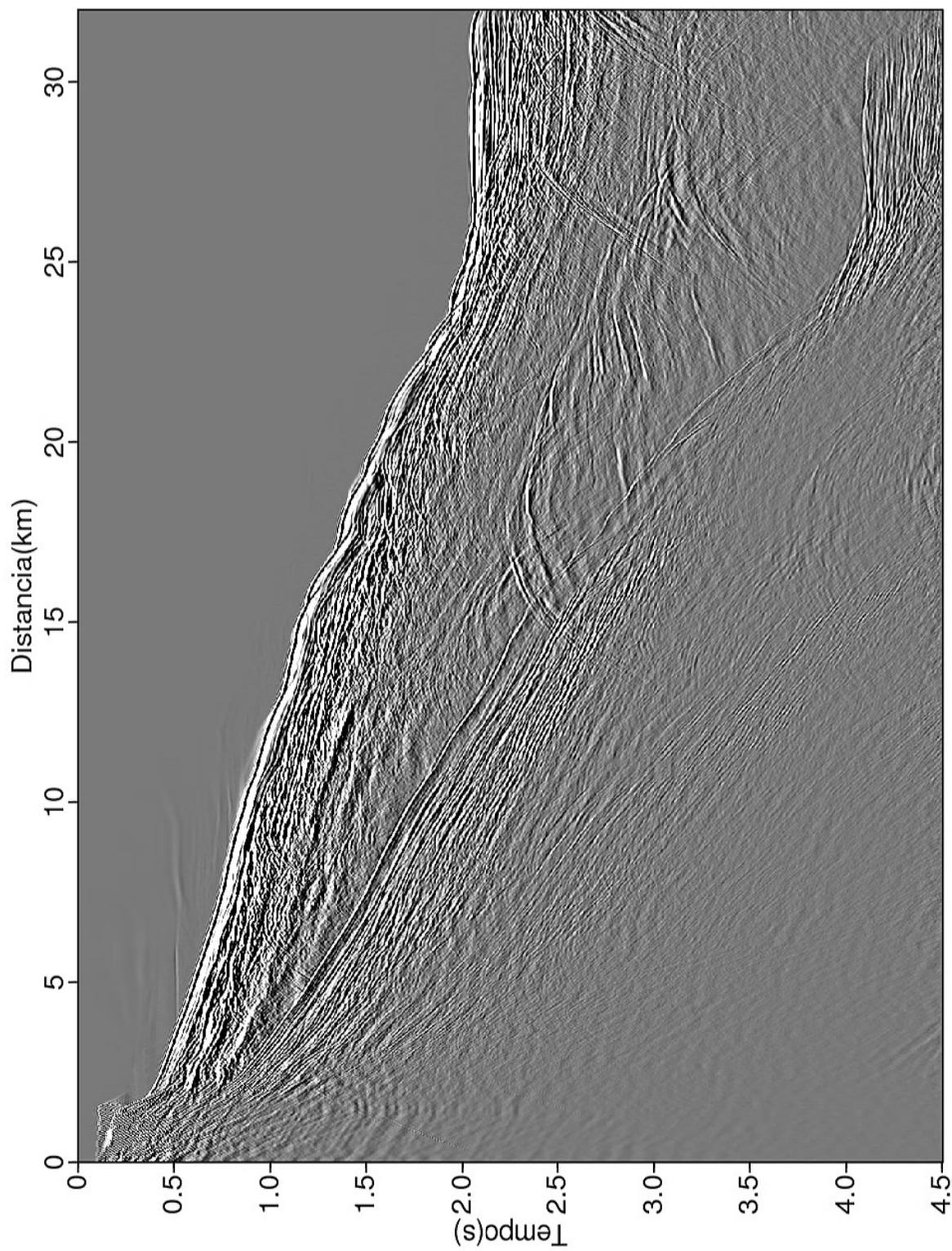


Figura 3.5: Seção sísmica empilhada obtida com os CMPs corrigidos de MMO.

Logo após o pré-condicionamento dos dados sísmicos foi aplicada a deconvolução preditiva multicanal, a qual necessita da inferência de três parâmetros: distância de predição " L ", número de coeficientes do filtro " nc " e quantidade de canais. Os dois primeiros parâmetros são calculados a partir do período estimado P .

No presente trabalho, o período das reflexões múltiplas associadas as reflexões primárias foi obtido na análise de velocidades preliminar, e corresponde ao tempo definido pelo ponto de coerência selecionado no espectro de velocidades do CMP analisado. Portanto, um conjunto de períodos foram obtidos, ou seja, para cada CMP analisado foi definido um período específico.

Vale ressaltar, que as múltiplas ocorrem em períodos de tempo aproximadamente igual ao dobro do tempo de registro da primária que ocorre no assoalho oceânico e esses eventos mascaram os eventos de reflexão verdadeiros que ocorrem em outras interfaces que tenham o mesmo tempo de registro ou estejam muito próximos da ocorrência da múltipla. Portanto, as múltiplas devem ser tratadas para que nas seções sísmicas não sejam confundidas como refletores reais, e causarem dessa forma, erros de interpretação sobre a geologia em subsuperfície.

A distância de predição " L " deve ser imediatamente menor que o período da múltipla, de forma que o algoritmo possa entender que logo após esse valor haverá atuação do operador preditivo. O valor de " L " no algoritmo é calculado a partir do período estimado.

O parâmetro de número de coeficientes " n " do operador ou filtro preditivo é importante pois prediz os eventos periódicos, como múltiplas, dessa forma a componente estimada do traço sísmico pode ser atenuada. O filtro de predição não atua nas amostras do traço sísmico contidas em " L ".

Após a realização de testes verificamos que os melhores resultados foram obtidos com $nc = 0.05P$ e $L = 0.96P$, então, foram feitas três aplicações da deconvolução com diferentes números de canais.

Na imagem da figura (3.6), observamos o efeito da deconvolução no CMP 4070 empregando 3, 5 e 7 canais. É posto um comparativo entre o CMP corrigido de MMO (com as múltiplas), e após a deconvolução. Pode-se observar que o ruído em 4.1s foi atenuado. Porém, após esse tempo há uma perda de informações mais evidente no último sismograma onde se utilizou 7 canais. O melhor resultado se deu com cinco, já que os sismogramas deconvolvidos com 3 e 7 apresentaram maiores resquícios do ruído da múltipla, além da perda de informações em tempos acima de 4.1s

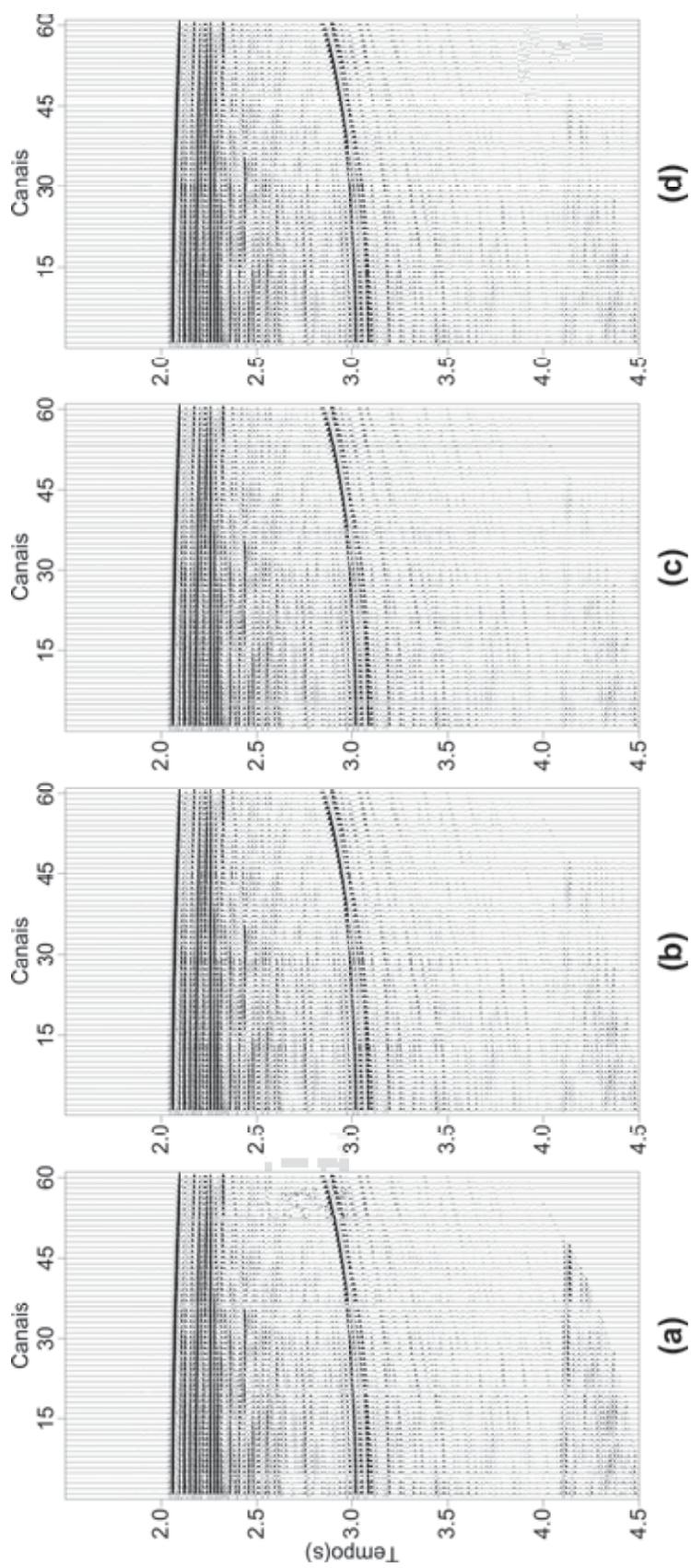


Figura 3.6: Sismograma CMP 4070 com correção MMO em (a), sismograma obtido após a deconvolução com 3 canais em (b), 5 canais em (c) e 7 canais em (d).

Na figura (3.7) é apresentada a seção empilhada gerada após a aplicação da deconvolução preditiva com o uso de 7 canais nas famílias CMPs corrigidas de MMO. Verifica-se nessa figura a efetividade da atenuação da múltipla de longo período associada a reflexão primária, principalmente, nas região central e mais profunda da seção empilhada.

Depois da atenuação da múltipla de longo período com a aplicação da deconvolução, foi realizada a correção MMO inversa, de maneira que as hiperbólica dos eventos de reflexão das famílias CMPs retornassem a sua forma hiperbólica. As velocidades usadas nesse processo foram as mesmas definidas na etapa de análise de velocidades preliminar.

Após as etapas de pré-condicionamento, deconvolução e correção MMO inverso foi feita a etapa de recuperação das amplitudes dos traços sísmicos como o uso do controle de ganho automático (AGC) empregando uma janela móvel de 0.5 segundos. Em seguida, foi realizada a análise de velocidades final para determinação do campo de velocidades a serem usados para corrigir o atraso no tempo (*moveout*) dos traços sísmicos.

Na figura (3.8) pode ser visto o campo de velocidades obtido após a análise de velocidades final em que se utilizou os CMPs livres da presença de múltiplas.

De posse do campo de velocidades estimado foi feita a correção NMO (*normal moveout*) que remove o atraso no tempo de registro causado pelo afastamento entre fonte e receptor. Com os sismogramas corrigidos de NMO foi realizado o empilhamento através da soma dos traços sísmicos de cada família CMP. A figura (3.9) ilustra a seção empilhada obtida.

A seção da figura (3.9) apresenta um boa resolução e livre de múltiplas de longo período, entretanto verifica-se a presença de difrações ao longo de toda a seção, possivelmente devido a existência de planos de falhas na subsuperfície.

A última etapa do fluxograma de processamento teve por objetivo tratar os eventos de difração, para isso, aplicamos a migração *phase-shift* do software adotado durante o processamento realizado *Seismic Unix* - SU. A figura (3.10) apresenta a seção sísmica migrada da linha sísmica processada. Pode ser verificada nessa seção que as difrações foram colapsadas e os refletores foram movidos para sua posição verdadeira no tempo. Após a migração, o intérprete pode mapear as estruturas geológicas em subsuperfície, tais como, as falhas que podem ser observadas na seção migrada obtida.

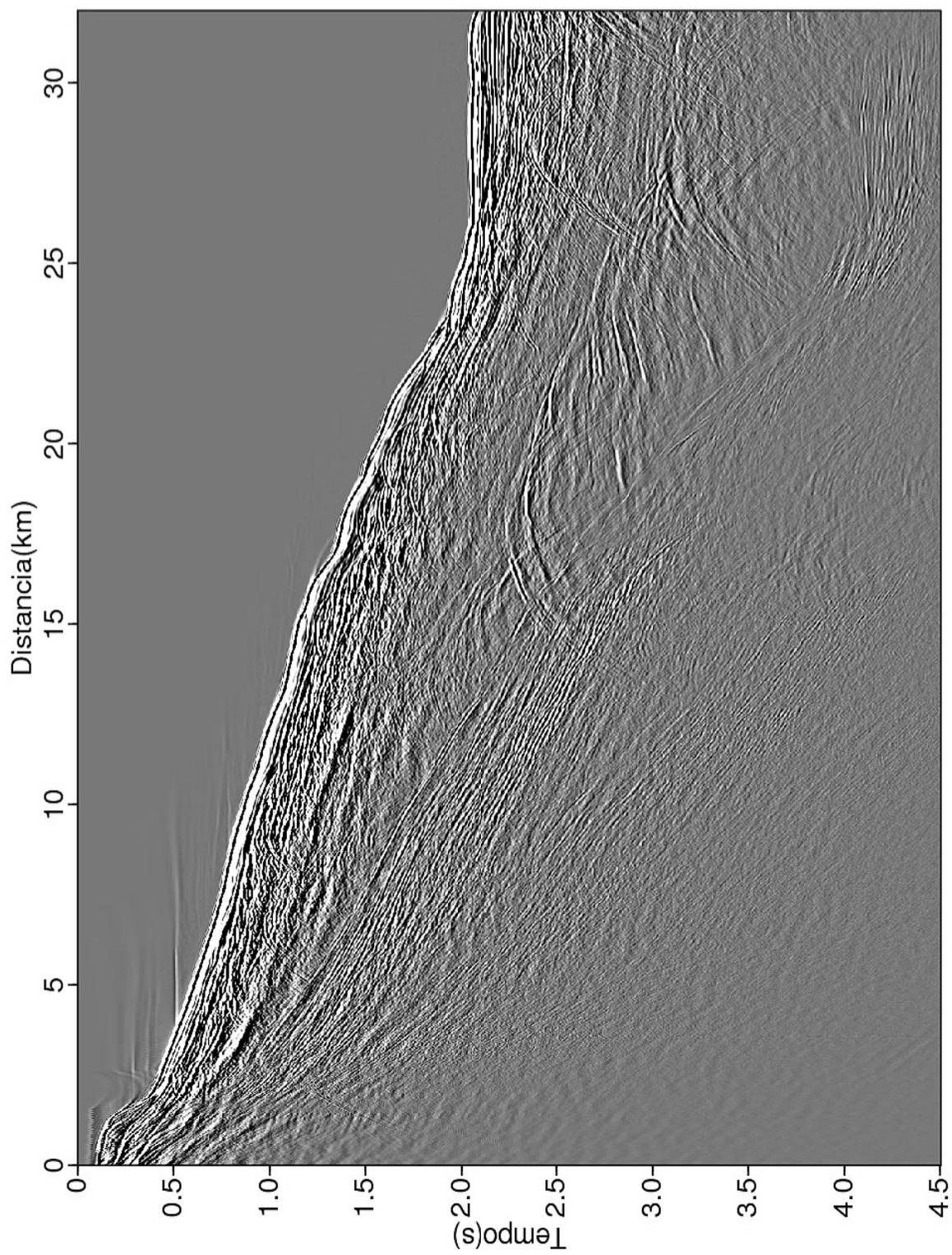


Figura 3.7: Seção sísmica empilhada após correção MMO e aplicação da deconvolução.

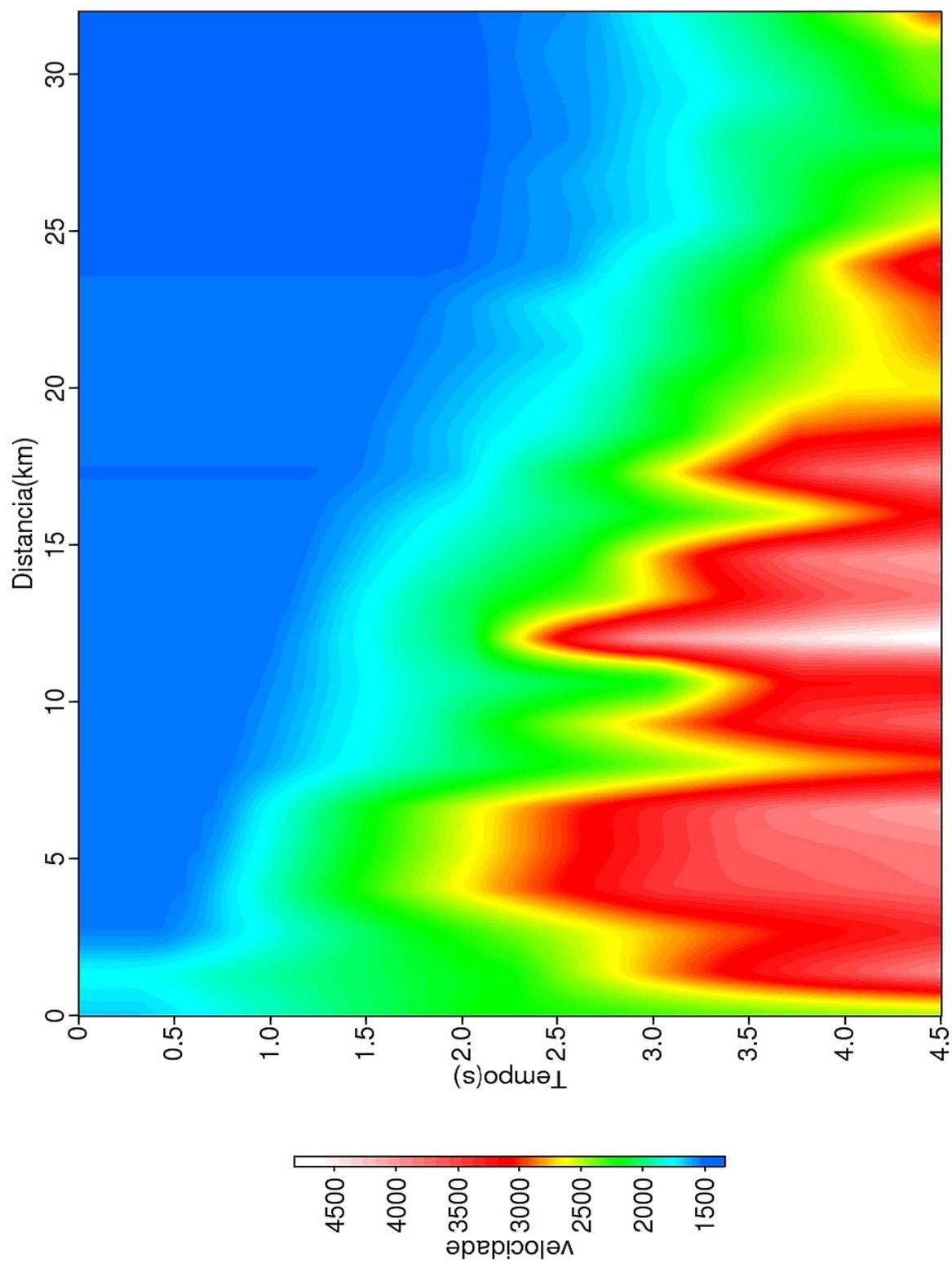


Figura 3.8: Campo de velocidades final da linha sísmica 0247-5519.

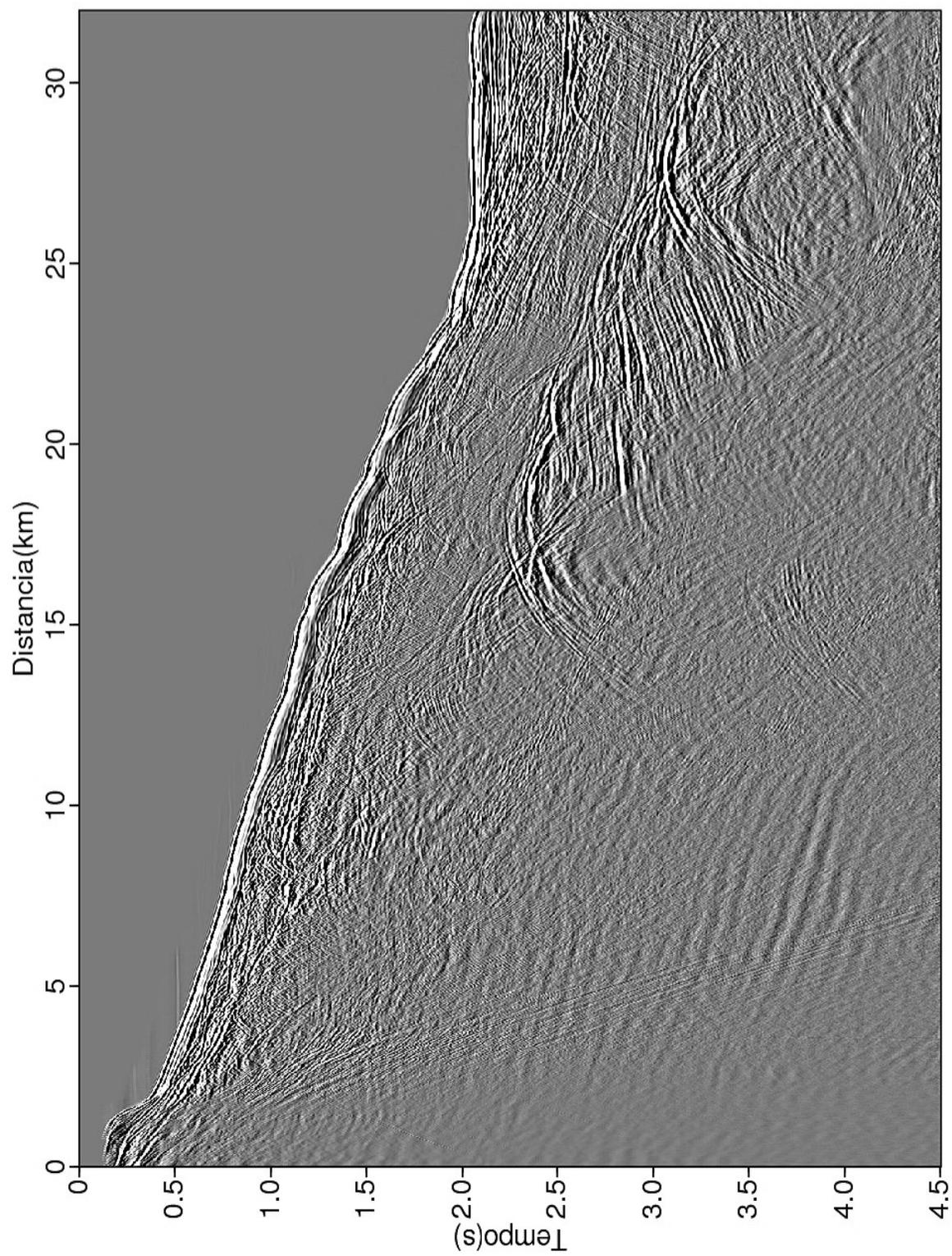


Figura 3.9: Seção sísmica empilhada final.

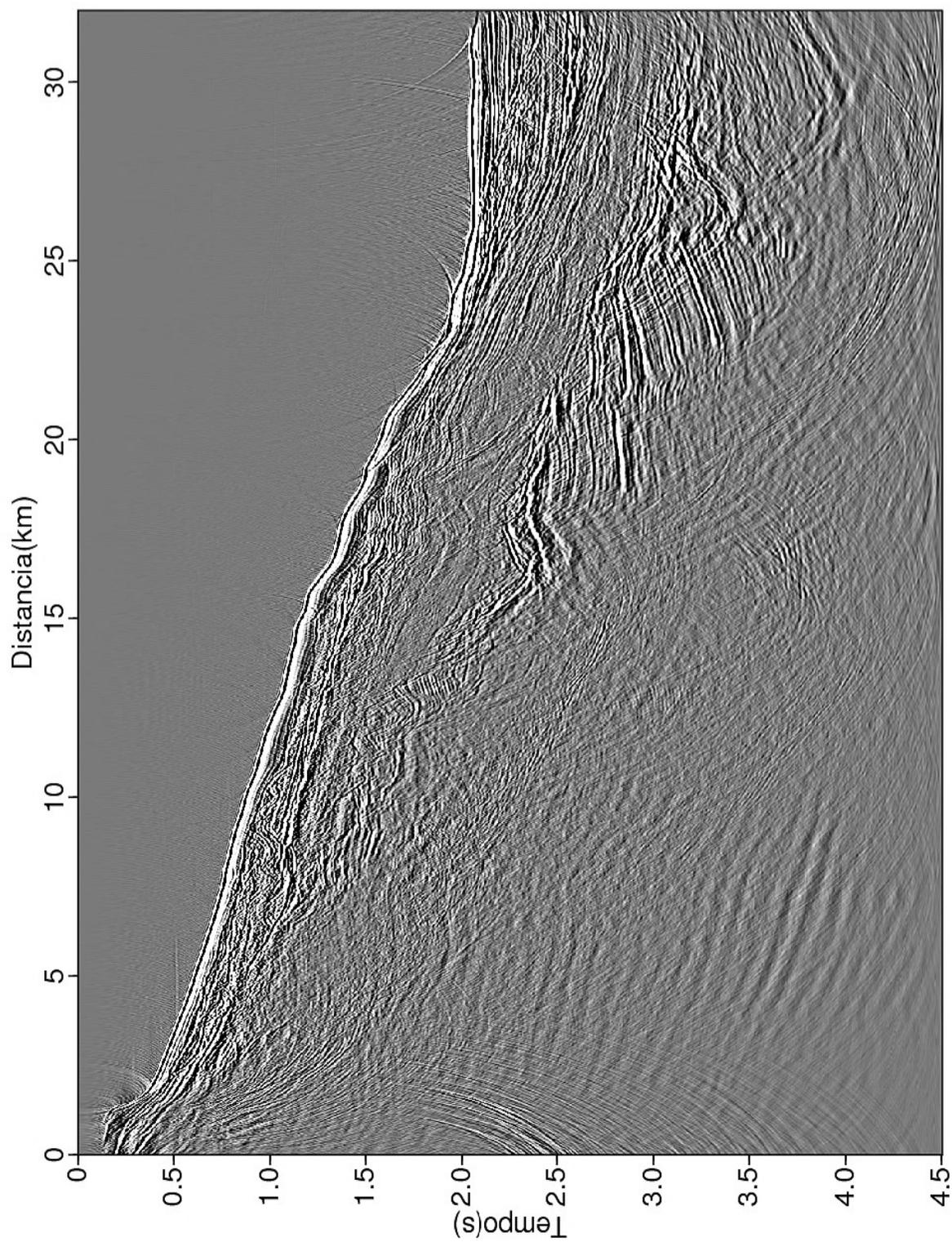


Figura 3.10: Seção sísmica migrada.

Capítulo 4

Conclusões

A Bacia de Camamu-Almada é uma das mais importantes do território leste brasileiro. Desde 1922 vem sendo amplamente explorada e há uma densa malha de linhas sísmicas, tanto em mar quanto na terra, que permeiam a mesma. Sendo de margem continental passiva, formada no fracionamento do super continente de Gondwana e abertura do atlântico, é possível nela encontrar diversas litologias como pacotes aluvionares, folhelhos lacustres, formações deltaicas, carbonatos e até herança de vulcanismos.

A aquisição sísmica marinha, de certa forma, não é tão fácil. Quanto mais nos aproximamos da costa, ou plataforma continental, mais interceptamos camadas finas de alta velocidade, as quais se traduzem com muitos ruídos periódicos no sismograma. Além disso, outros processos fazem parte da dificuldade na aquisição e processamento como absorção do meio, divergência esférica, transformação da energia em calor, alta impedância de camadas superficiais e profundas - este último exemplo é um grande problema, não só nas aquisições marinhas mas também nas terrestre, como na Bacia do Solimões. Resumindo, a energia trapeada forma uma série de tipos de múltiplas não simétricas indesejadas.

Como ferramenta para lidar com essa problemática, temos o método de deconvolução preditiva multicanal. Dependendo da precisão dos parâmetros utilizados, podemos suprimir bem o fantasma da múltipla que mascara as reflexões primárias. O método de deconvolução empregado no trabalho foi bastante eficaz na atenuação das múltiplas de primeira ordem associadas às reflexões primárias do assoalho oceânico da linha sísmica 0247-5519 da Bacia de Camamu-Almada.

Os parâmetros utilizados na deconvolução no presente trabalho, foram adequados para o tratamento da múltipla de longo período da linha sísmica processada, sendo estimados através do período da múltipla. Portanto, para o método de deconvolução preditiva multicanal é de importância fundamental a estimativa o mais precisa possível do período das múltiplas.

Quando se utiliza um número grande de canais no método empregado ocorre um aumento do tempo de processamento. Além disso, observamos que com sete ou mais canais, a deconvolução causou perdas de

informação de interesse nos sismogramas CMPs.

Por meio da análise de velocidades preliminar foi possível estimar o período e as velocidades necessárias para correção MMO. Este processo é importante pois cria uma condição mais favorável para aplicação do método de deconvolução preditiva multicanal. A correção MMO torna mais simples de localizar, visualizar, "janelar" e suprimir os eventos periódicos. Logo, pode-se concluir que a deconvolução preditiva multicanal precisa de uma certa simetria entre os eventos para aumentar a sua eficácia.

A seção sísmica da linha 0247-5519 obtida através do fluxograma de processamento realizado apresentou boa resolução temporal e atenuação da múltipla de longo período.

Como recomendação para trabalhos futuros, seria interessante aplicar o método de deconvolução preditiva adaptativa para o tratamento de múltiplas de curto período associadas à águas mais rasas da Bacia de Camamu-Almada, bem como realizar um comparativo com resultados obtidos em relação a outros métodos.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à Deus.

Ao meus pais, pois sem eles não teria conseguido.

Ao professor Michelângelo ter sido meu orientador.

À meu irmão, Renan, por ter sempre confiado em mim.

Agradeço ao professor Sato ter me guiado.

Ao professor Porsani, pelo conhecimento à mim passado e por crer no meu potencial.

Agradeço à Jú K. Fagundes Santos por ter me dado força e energia na conclusão dessa etapa.

Agradeço à empresa Landmark/Halliburton pela licença acadêmica disponibilizada do software de processamento SeisSpace ao CPGG-UFBA.

Agradeço a todos que de certa forma me impulsionaram para a conclusão deste trabalho.

Referências

- Araujo, F. C. (2007) Caracterização geoquímica de óleos das Bacias Camamu-Almada e Jequitinhonha, Bahia, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Chang, H. K.; Kowsmann, R. O.; Figueiredo, A. M. F. e Bender, A. (1992) Tectonics and stratigraphy of the east Brazil rift system: an overview, *Tectonophysics*, **213**(1-2):97–138.
- Enzila, E. J. M. (2018) Atenuação de reflexões múltiplas e uso de atributos sísmicos para estudo de reservatórios, Dissert. de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- Gonçalves, F. T. T. (2001) Controles limnológicos sobre a formação de rochas geradoras de petróleo lacustres: o exemplo da Bacia de Camamu, Nordeste do Brasil, *Geociências*, **20**:5–23.
- Kukreja, N.; Louboutin, M.; Lange, M.; Luporini, F. e Gorman, G. (2017) Rapid development of seismic imaging applications using symbolic math.
- Lima, A. P. (1999) Deconvolução de reflexões múltiplas nos domínios τ -X e τ -P com filtros multicanais, Dissert. de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- Lima, L.; Porsani, M.; Maciel, R. e Silva, M. (2007) Deconvolução preditiva multicanal de reflexões múltiplas na região do talude continental.
- Porsani, M. J. e Ursin, B. (2007) Direct multichannel predictive deconvolution, *Geophysics*, **72**(2):H11–H27.
- Robinson, E. A. e Treitel, S. (1980) *Geophysical signal analysis*, vol. 263, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Santos, J. M. e Vasconcellos, R. V. A. (2019) Bacia de Camamu-Almada, 13a. rodada, Superintendência de Definição de Blocos, Disponível em: https://pt.slideshare.net/ANPgovbr/bacia-de-camamualmada?from_action=save, acessado em 04/07/2021.
- Souza, M. P. (2018) Atenuação de múltiplas associadas a derrames de diabásio na Bacia de Solimões utilizando a transformada radon parabólica e a deconvolução preditiva multicanal, Dissert. de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.

- Torres, T. C. (2008) Processamento e interpretação de dados sísmicos 2–D da Bacia de Camamu. Trabalho de graduação em geofísica, Rel. Téc., Universidade Federal da Bahia.
- Valente, B. e Ferreira, A. (2019) Bacia de Camamu-Almada, Sumário Geológico e Setores em Oferta, Superintendência Definição de Blocos, ANP, Disponível em: http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Bienio/Mapas_R16/Sumario_Geologico_R16_Camamu-Almada.pdf, acessado em 12/09/2019.
- Verschuur, D. J. (2013) Seismic multiple removal techniques: past, present and future, EAGE publications.
- Yilmaz, Ö. (2001) Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data, Society of Exploration Geophysicists.