



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

CRISTIANE DE SOUZA COSTA

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS DE PROCESSAMENTO PARA
ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE EM DADOS
SÍSMICOS 2D**

BELÉM
2011

CRISTIANE DE SOUZA COSTA

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS DE PROCESSAMENTO PARA
ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE EM DADOS
SÍSMICOS 2D**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento as exigências para obtenção do diploma de Graduação em Geofísica.

Orientadora: Ellen de Nazaré Souza Gomes

BELÉM
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

C837a	Costa, Cristiane de Souza
	Avaliação de fluxos de processamento para atenuação de múltiplas de superfície em dados sísmicos 2D / Cristiane de Souza Costa; Orientador: Ellen de Nazaré Souza Gomes – 2011
	57 f. : il.
	Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Segundo Período de 2011.
	1. Geofísica. 2. Fluxo de processamento sísmico. 3. Atenuação de múltiplas. 4. SRME. 5. Filtragem Radon. I. Gomes, Ellen de Nazaré Souza, <i>orient.</i> II. Universidade Federal do Pará. III. Título.
	CDD 20 ed.:551

CRISTIANE DE SOUZA COSTA

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS DE PROCESSAMENTO PARA
ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE EM DADOS
SÍSMICOS 2D**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento as exigências para obtenção do diploma de Graduação em Geofísica.

Data de Aprovação: / /

Banca Examinadora:

Prof. Ellen de Nazaré Souza Gomes - Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Jessé Carvalho Costa - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Francisco de Assis Silva Neto - Membro
Doutor em Geofísica
Secretaria de Estado de Educação

Dedico este trabalho aos meus pais, meus irmãos e todos meus amigos por terem me ajudado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria concluído sem ajuda de Deus, que me mantém viva e com condições de concluir-lo, e por diversas pessoas as quais expresso meus agradecimentos:

Aos meus familiares especialmente meus pais, pelo incentivo em todas os momentos da minha vida;

A minha orientadora, Professora Ellen N. S. Gomes pela orientação que me mostrou os caminhos a serem seguidos e pelo esforço necessário para que esta etapa fosse concluída;

Ao Francisco Neto e ao Professor Jessé C. Costa, pela honrosa participação na banca examinadora e por outras colaborações;

Aos professores e professoras do curso de graduação em geofísica, pelos importantes ensinamentos;

As entidades FADESP e PETROBRAS pelo suporte financeiro e técnico;

A todos os amigos adquiridos no CPGF e UFPA durante este período de aprendizagem, em especial a turma de 2006, por todos os momentos bons;

Aos colegas Victor Lopes, Andrei Oliveira e o técnico do Prosis Roberto pela constante ajuda para o desenvolvimento deste trabalho;

Por Fim, aos meus amigos e companheiros Marcio Ricardo, Rodrigo Mendonça (*vulgo Velhinho*), Carolina Tadaeisky e Marina Fagundes (*vulgo as meninas surper-poderosas*) pela amizade e ajuda incondicional durante a realização deste trabalho. Peço sinceras desculpas áqueles que não foram citados, e que de alguma forma contribuíram para minha formação.

*A mente humana, uma vez ampliada por
uma nova idéia, nunca mais volta a seu
tamanho original.*

Oliver Wendell Holmes

RESUMO

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo da aplicação de um fluxo de processamento, para atenuação e se possível eliminação de múltiplas de superfície livre em dados sísmicos 2D. Foram empregadas duas técnicas de atenuação: a técnica baseada na periodicidade e predição das múltiplas, o SRME; e a baseada na diferença de comportamento espacial entre múltiplas e primárias, a filtragem Radon. Os dados sísmicos foram processados no pacote ProMAX, software licenciado pela empresa *Landmark*. Os resultados foram satisfatórios quando comparados com os resultados obtidos sem a aplicação de metodologia específica.

Palavras-Chave: Geofísica. Fluxo de processamento sísmico. Atenuação de múltiplas. SRME. filtragem Radon.

ABSTRACT

The work was developed with the objective of applying a processing flow for the attenuation and possible elimination of multiple free surface of 2D seismic data. Were used two multiple attenuation techniques: the first technique was based on the periodicity and prediction of the multiple (SRME); and the second was based in the difference behavior between multiple and the primary on space (Radon filtering). The seismic data were processed using PROMAX package, software licensed by the company Landmark. The results were satisfactory when compared with the results obtained without the application of specific methodology.

Key Words: Geophysics. Seismic processing flow. Multiple atenuation. SRME. Radon filter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Esquema mostrando a localização geográfica das linhas construídas pela equipe sísmica 214 da PETROBRAS na Bacia do Jequitinhonha.	16
Figura 2.2	Visualização do dado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.	17
Figura 2.3	Visualização do dado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.	18
Figura 3.1	Diagrama da aquisição de dados marinhos com arraste de cabos. As ondas descendentes que saem das fontes representam as ondas incidentes e as ondas ascendentes que chegam aos hidrofones no cabo, representam as reflexões primárias. Neste tipo de levantamento, além dos eventos de reflexão primária, observam-se as múltiplas de superfície livre, fontes e receptores fantasmas, devido a interface água/ar.	20
Figura 4.1	Fluxograma de processamento sísmico de dados 2D. a) Fluxo de um processamento convencional. b) Fluxo de processamento adicional utilizado neste trabalho (SRME seguido do Radon).	22
Figura 4.2	Modelo convolucional para geração de um sismograma em tempo.	23
Figura 4.3	Visualização do modelo de velocidades RMS da Linha sísmica 66.	25
Figura 4.4	Correção do tempo de trânsito. (a) Antes da correção NMO. (b) Depois da correção NMO.	26
Figura 4.5	(a) Família de CMP. (b) Aplicada a correção NMO. (c) Posterior silenciamento. (d) traços empilhado simulando afastamento nulo.	27
Figura 4.6	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla. (a) Evento sísmico com duas reflexões ascendentes e (b) uma reflexão descendente na superfície livre.	29
Figura 4.7	Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de superfície livre.	29
Figura 4.8	Construção da múltipla de primeira ordem relacionada à superfície através da junção de reflexões primárias segundo Verschuur (2006).	31
Figura 4.9	O Filtro Radon concentra a energia dos eventos parabólicos do domínio espaço-tempo ($t - x$) em regiões diferentes no domínio $\tau - p$. Quando o evento possui seu ponto de máximo valor em $x = 0$, o tempo de intercepção (τ) é definido como a posição (em tempo) do ápice da parábola no domínio do espaço-tempo.	35
Figura 5.1	Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 do dado no estado bruto organizado em seção de	

Afastamento Comum de 150 m, linha 66.	38
Figura 5.2 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 apenas com o SRME organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.	39
Figura 5.3 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 apenas com o Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.	40
Figura 5.4 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 com o SRME seguido do Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.	41
Figura 5.5 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 do dado no estado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.	42
Figura 5.6 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 apenas com o SRME organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.	43
Figura 5.7 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 apenas com o Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.	44
Figura 5.8 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 com o SRME seguido do Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.	45
Figura 5.9 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada no estado bruto, linha 66.	46
Figura 5.10 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada apenas com o SRME, linha 66.	47
Figura 5.11 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada apenas com o Radon, linha 66.	48
Figura 5.12 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada com o SRME seguido do Radon, linha 66.	49
Figura 5.13 Seção mostrando o resultado da migração a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 apenas com o fluxo convencional, linha 66.	50
Figura 5.14 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 migrada no estado bruto, linha 97.	51
Figura 5.15 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 1270 migrada apenas com o SRME, linha 97.	52

Figura 5.16 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 1200 migrada apenas com o Radon, linha 97.	53
Figura 5.17 Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 migrada com o SRME seguido do Radon, linha 97.	54
Figura 5.18 Seção mostrando o resultado da migração a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 apenas com o fluxo convencional, linha 97.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	BACIA DO JEQUITINHONHA	15
3	GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO	19
4	FLUXO DE PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS	21
4.1	PRÉ-PROCESSAMENTO	21
4.2	PROCESSAMENTO	22
4.2.1	Deconvolução ao pulso sísmico	22
4.2.2	Análise de velocidade	24
4.2.2.1	Correção NMO	26
4.2.3	Empilhamento	27
4.2.4	Migração	28
4.3	PROCESSAMENTO ADICIONAL	29
4.3.1	Método de eliminação de reflexões múltiplas relacionadas a superfície (SRME)	30
4.3.2	Transformada Radon	34
5	RESULTADOS	36
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Para a criação de imagens em subsuperfície a sísmica de reflexão tornou-se o método mais utilizado, devido sua alta resolução aliado a um custo computacional relativamente baixo.

Fatores como complexidade do meio, baixa razão sinal/ruído, presença de múltiplas dentre outros, prejudicam o imageamento sísmico.

Para dados marinhos em particular, a presença de múltiplas de superfície livre¹ afeta a qualidade das imagens sísmicas, uma vez que podem possuir energia considerável, atenuando reflexões primárias mais profundas, ocasionando assim confusões na interpretação das imagens sísmicas (VERSCHUUR, 2006).

O presente trabalho, dá continuação ao apresentado por Mendonça (2009) e tem por objetivo a aplicação e análise do fluxo de processamento em duas linhas reais 2D da Bacia do Jequitinhonha. Neste fluxo foi empregada a combinação de duas técnicas de atenuação: uma baseada na periodicidade e predição das múltiplas (SRME²) e outra baseada na diferença de comportamento espacial entre múltiplas e primárias (Transformada Radon) (VERSCHUUR, 2006).

O trabalho está dividido da seguinte forma: Ao segundo capítulo é apresentado uma breve descrição sobre Bacia do Jequitinhonha - área de estudo. No terceiro capítulo é feita uma descrição sobre aquisição das linhas analisadas. No quarto capítulo os fluxos de processamento sísmico aplicado neste trabalho é descrito. Por último, no quinto capítulo esses fluxos são aplicados aos dados e os resultados analisados.

¹Múltiplas de superfície livre - se originam nas interfaces terra/água e água/ar, causada pelas grandes diferenças de impedância entre essas interfaces.

²SRME: Eliminação de Múltiplas Relacionadas à Superfície (Do inglês: *Surface-Related Multiple Elimination*).

2 BACIA DO JEQUITINHONHA

A Bacia do Jequitinhonha pertence ao grupo de bacias litorâneas do Brasil. Situa-se na costa sul do Estado da Bahia, entre os paralelos 14°37' Sul e 16°24' Sul, na costa leste brasileira. Ela possui uma área de 25.685 km² (RANGEL et al, 2007), a qual, somente 20% da área total da bacia se encontra em zonas emersas (*onshore*), o que a caracteriza como uma bacia eminentemente marítima (*offshore*). Limita-se ao norte com a Bacia de Camamu-Almada pelo Alto de Olivença (SANTOS et al, 1994) e ao sul, limita-se com a Bacia de Cumuruxatiba através do banco vulcânico de Royal Charlotte, o qual é responsável pelo alto estrutural que define o limite. A Bacia do Jequitinhonha é composta por terrenos predominantemente granulíticos, possui um padrão de falhas, em que predominam falhas normais e de extensão. As de extensão apresentam indícios que originaram o complexo vulcânico Royal Charlotte, correspondente a elevação do embasamento na parte sul. A partir da falha de borda, que constitui o limite de deposição cretácea da bacia, as falhas normais aprofundam-se e estendem-se supostamente por toda a área sedimentar, formando *horsts*, *grabens* e *semi-grabens* (CÓRDOBA, 1990). Na parte distal, ela apresenta estruturas complexas compressoriais associadas à tectônica gravitacional, tendo fluxos salinos com vergência em sentido offshore.

O embasamento da Bacia do Jequitinhonha é constituído predominantemente por rochas do Proterozóico Superior¹, composta por meta-carbonatos, metapelitos, metarenitos com baixo grau de metamorfismo.

Neste trabalho é apresentado um fluxo de processamento para linhas 214-2660 e 214-2970², que são do tipo *Dip*³ da Bacia do Jequitinhonha. A localização das linhas marinhas 2D está apresentada na Figura 2.1⁴.

¹Rochas Pré-Cambriana da Era do Neo-Proterozóico com datação aproximada de 630 Ma.

²Neste trabalho essas linhas 214-2660 e 214-2970 serão chamadas de linhas 66 e 97 respectivamente.

³Linha sísmica marinha coletada perpendicular a costa continental.

⁴Informações retira da prévia da Dissertação de Victor H. R. Lopes.

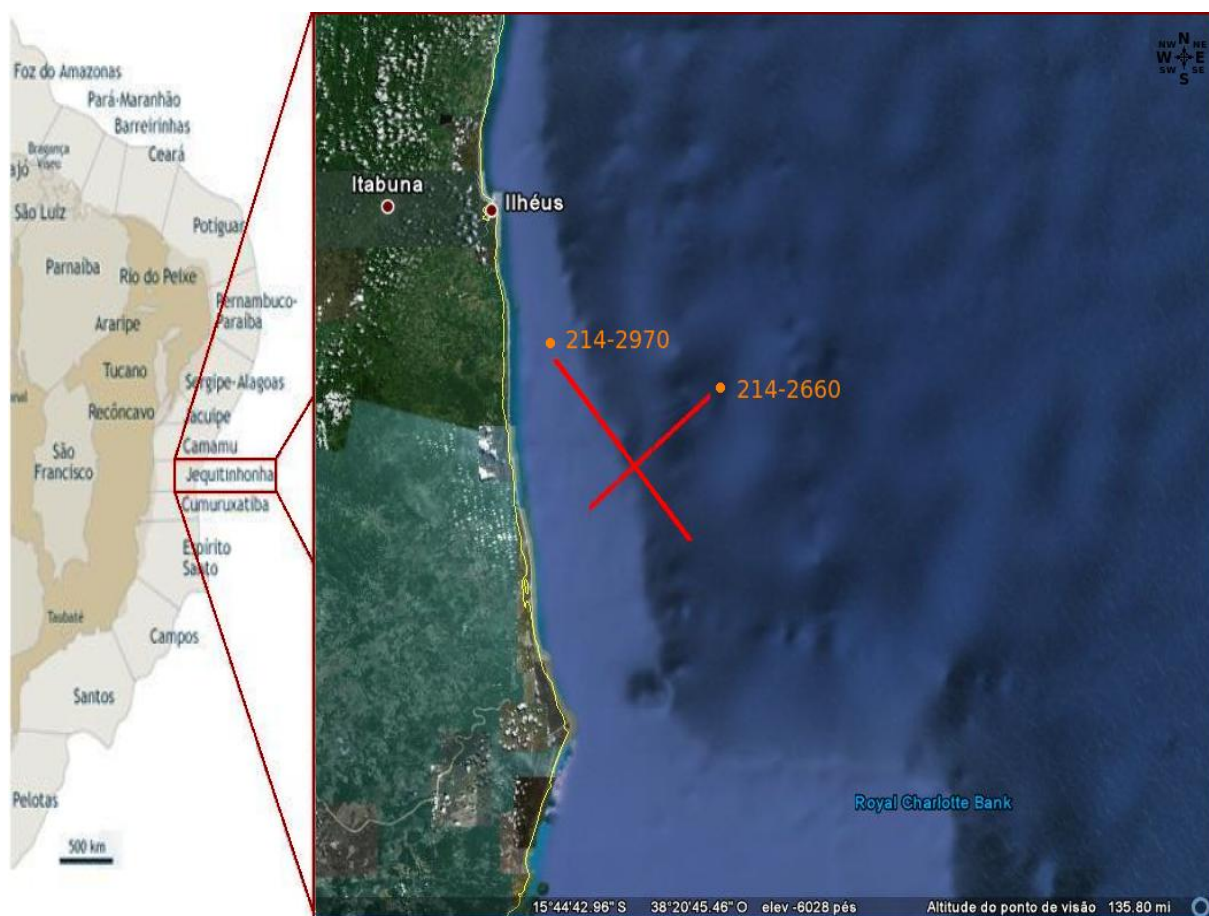


Figura 2.1: Esquema mostrando a localização geográfica das linhas construídas pela equipe sísmica 214 da PETROBRAS na Bacia do Jequitinhonha.

Fonte: Adaptado de Lopes (2010).

As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram as seções brutas das respectivas linhas, organizadas em Afastamento Comum⁵. Nesse tipo de dado é comum a presença de múltiplas devido a interface ar/água e água/terra, chamada de múltiplas de superfície. Esse tipo de múltipla possui energia considerável podendo ser confundida com primárias de refletores mais profundos. As múltiplas apresentam algumas propriedades que as diferem das primárias. Entre estas propriedades podemos destacar: a velocidade, a frequência, o espalhamento geométrico, a inclinação e a periodicidade (GAMBOA, 2003). Através desta última propriedade, podemos prever o comportamento das múltiplas no tempo, e então depois de modeladas essas múltiplas podem ser subtraídas dos dados sísmicos (MENDONÇA, 2009). O método SRME utilizado neste trabalho se baseia nesta propriedade para distinguir múltiplas de primárias. Nas seções a seguir as múltiplas de superfície livre, são identificadas especialmente pela diferença de *moveout*⁶ entre as múltiplas e as primárias (indicadas pela letra M), e estão mais visível na parte mais profunda da bacia onde apresenta um *moveout*⁷ maior que as primárias.

⁵Afastamento Comum: Do inglês *Common Offset* (CO).

⁶Palavra derivada do inglês que significa sobretempo referindo-se ao tempo de trânsito de um evento.

⁷Palavra derivada do inglês que significa sobretempo referindo-se ao tempo de trânsito de um evento.

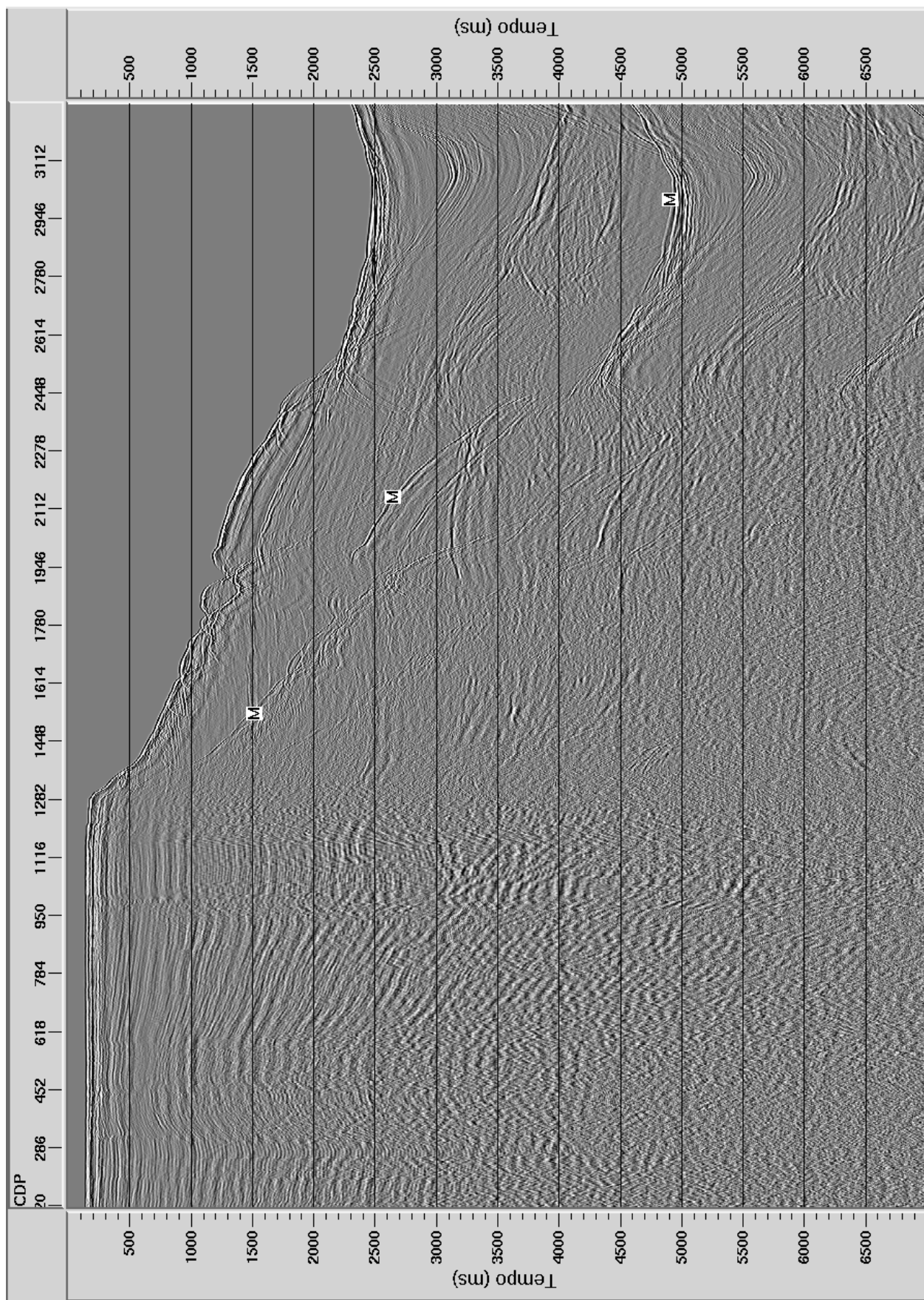


Figura 2.2: Visualização do dado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.

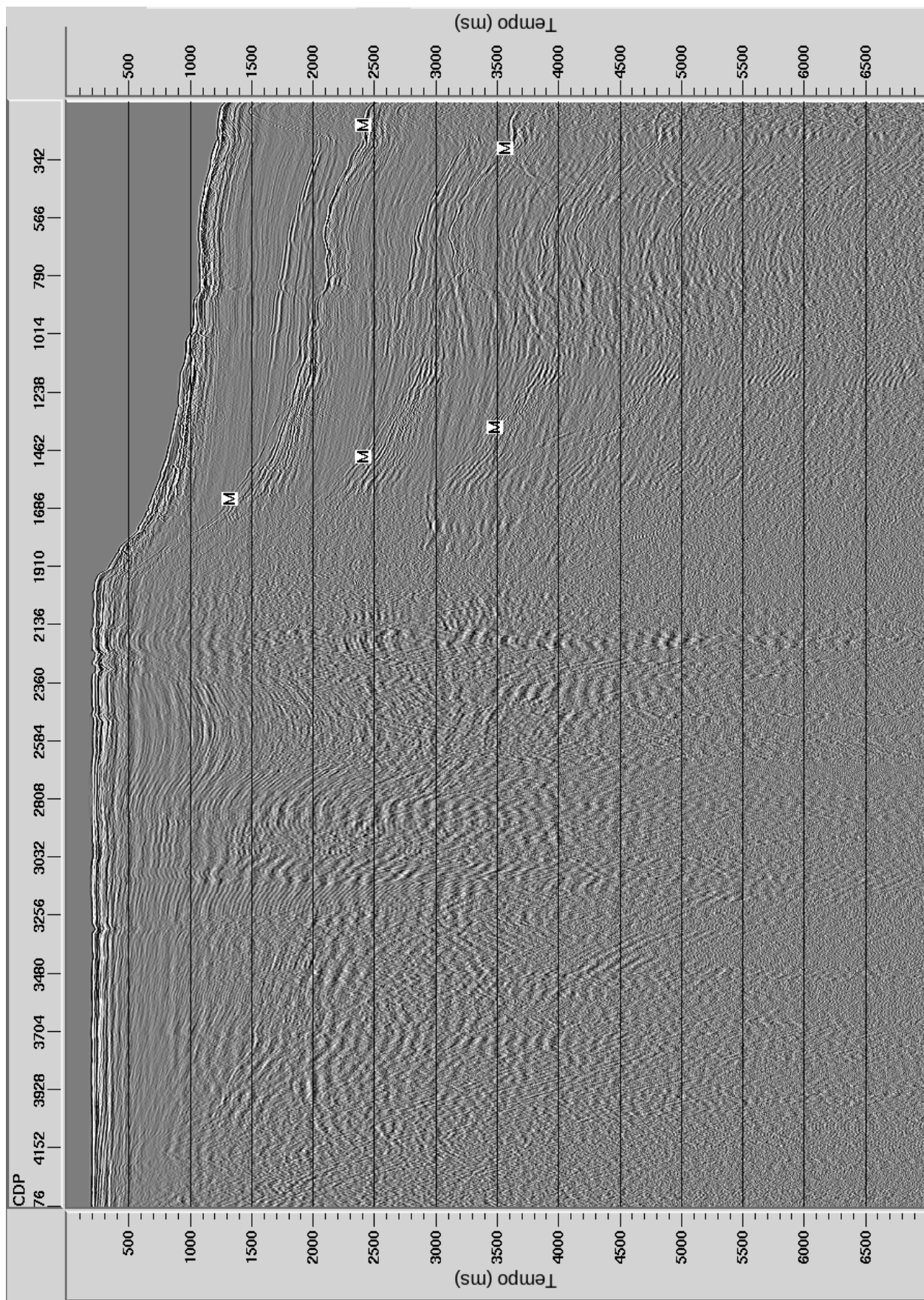


Figura 2.3: Visualização do dado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.

3 GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO

Neste capítulo será descrito a aquisição sísmica 2D realizada nas linhas 66 e 97 da Bacia do Jequitinhonha. O levantamento em questão foi realizado na parte submersa da bacia, pela equipe 214 da PETROBRÁS. Na aquisição dos dados utilizou-se o levantamento de arraste de cabo marinho¹, em que um navio reboca um conjunto de fontes, canhões de ar², seguido de um cabo³ contendo os hidrofones. Os cabos rebocáveis flutuadores (*streamers*) são os mais utilizados devido à simplicidade de sua operação, essa técnica é utilizada geralmente em águas com mais de vinte metros de profundidade. A Figura 3.1 mostra a simulação da geometria de aquisição de dados marinhos com arraste de cabos.

Os parâmetros de aquisição descritos abaixo foram retirados dos Relatórios de Campo⁴ de cada linha. Estas linhas foram divididas segundo suas respectivas direções: NE-SW e NW-SE, e mostrada na Figura 2.1.

A linha 66, foi construída sob a configuração 2D de direção NE-SW, foram realizados 1577 tiros, totalizando aproximadamente 39,4 km de linha sísmica no azimute 50° N (sentido NE). A linha 97 de direção NW-SE, foi construída com a mesma configuração da 66, diferindo apenas no número de tiros realizados durante a aquisição e no sentido de movimentação da embarcação⁵. Esta linha foi construída sob 2169 tiros totalizando aproximadamente 53,2 km em sentido NW no azimute 320° N. Detalhes sobre a geometria estão na tabela 3.1.

¹Conhecido em inglês por *Mariener Tower Streamer*.

²Conhecido em inglês por *air-gun*.

³Conhecido em inglês por *streamers*.

⁴Relatórios de Campo: Relato diário sobre o andamento dos trabalhos nos levantamentos sísmicos, segundo (DUARTE, 2003).

⁵Sentido adotado durante a aquisição sísmica em relação ao Norte Geográfico.

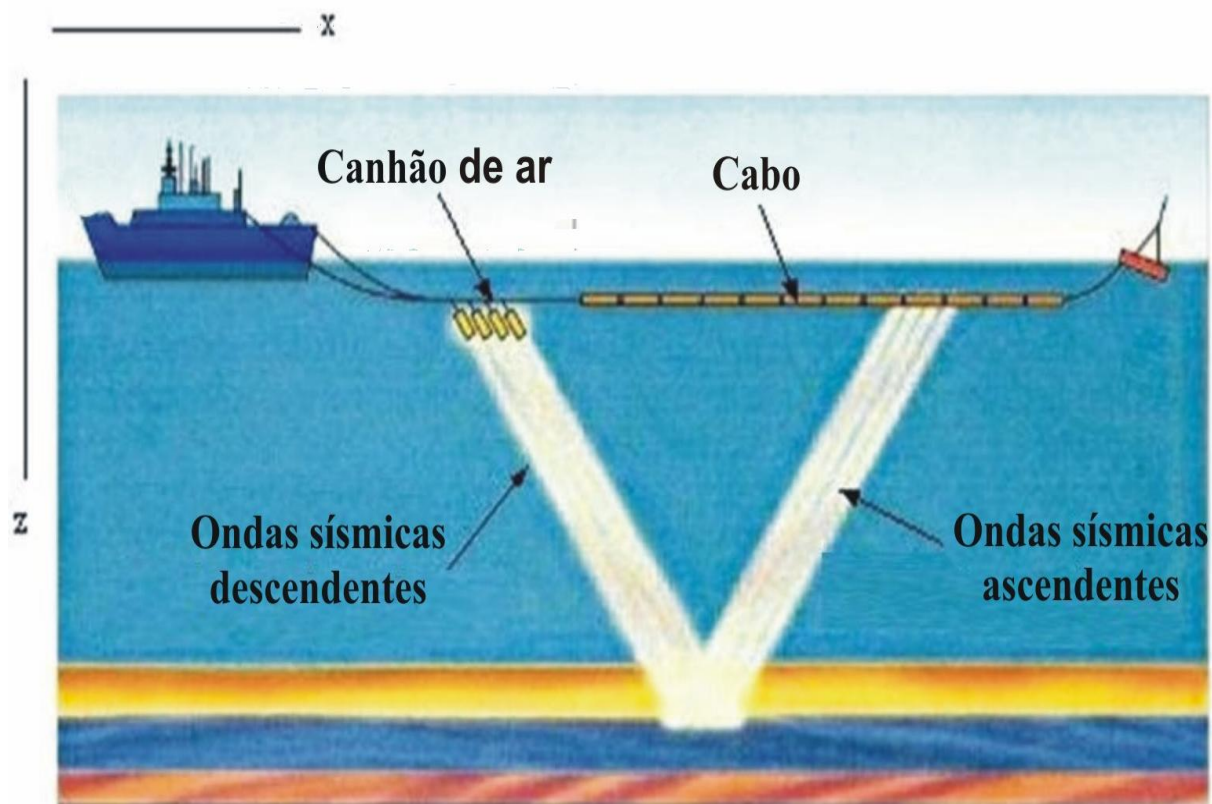


Figura 3.1: Diagrama da aquisição de dados marinhos com arraste de cabos. As ondas descendentes que saem das fontes representam as ondas incidentes e as ondas ascendentes que chegam aos hidrofones no cabo, representam as reflexões primárias. Neste tipo de levantamento, além dos eventos de reflexão primária, observam-se as múltiplas de superfície livre, fontes e receptores fantasmas, devido a interface água/ar.

Fonte: Modificado de Ikelle; Amundsen (2005).

Linhas sísmicas	66	97
Número de fontes	1577	2129
Número de receptores	120	120
Intervalo entre fontes (m)	25	25
Intervalo entre receptores (m)	25	25
Afastamento mínimo (m)	150	150
Afastamento máximo (m)	3125	3125
Profundidade da fonte (m)	9	9
Profundidade média do cabo (m)	10,5	10,5
Intervalo de amostragem (ms)	4	4
Tempo de registro (s)	7	7

Tabela 3.1: Parâmetros de aquisição das linhas processadas neste trabalho.

4 FLUXO DE PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS

Neste capítulo são apresentados as etapas do fluxo de processamento sísmico, normalmente dividida em duas fases de execução, o pré-processamento e o processamento, aplicados nas linhas 66 e 97. Neste fluxo é aplicado o SRME em conjunto com o filtro Radon. Com objetivo de comparação essas linhas também foram submetidas ao fluxo de processamento sísmico convencional. A Figura 4.1 mostra o fluxograma contendo as etapas do fluxo convencional de processamento sísmico (a) e o fluxo de processamento eficaz¹ utilizado neste trabalho (b). Vale ressaltar que a correção de amplitude e a Deconvolução do pulso sísmico não serão aplicadas no tratamento do fluxo contendo o SRME, pois para a aplicação do SRME, as amplitudes do sinal devem ser preservadas. O processamento das linhas sísmicas foram inteiramente realizada no ProMAX, software licenciado pela empresa *Landmark*. Foi aplicado um AGC² em todas as seções sísmicas ilustradas neste trabalho.

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento envolve as seguintes etapas:

- Montagem da geometria 2D: o objetivo é registrar nos cabeçalhos (*headers*) de cada traço sísmico a geometria de aquisição de acordo com as informações disponíveis no Relatório de Campo. As possíveis correções possibilitam entre outras coisas a organização dos traços em famílias CMP's³;
- Edição de traços: na edição de traços são verificados os traços com ruídos. Os canais que não tiveram um funcionamento adequado, e os tiros que não funcionam devem ser silenciados;
- Filtro de frequência: a energia das reflexões primárias está concentrada em um certo intervalo de frequências de aproximadamente 10 a 70 Hz. Eventos fora dessa banda de frequência são considerados ruídos, sendo possível a separação do ruído da informação de reflexão. Assim são aplicados filtros para a atenuação dos eventos fora da faixa de frequência de interesse. O filtro mais utilizado é o de banda-passante;
- Correção de amplitudes do sinal sísmico: há fatores que contribuem para que ocorra decaimento da amplitude de uma onda sísmica ao se propagar no interior da Terra. Para compensar esse decaimento é aplicado correção de amplitude por divergência esférica,

¹Processamento eficaz: Além da etapa do processamento convencional será aplicado a combinação do SRME seguido da filtragem Radon.

²AGC: Controle de ganho automático do inglês que significa: *Automatic Gain Control*.

³CMP: Ponto Médio Comum (do inglês *Common Mid Point*).

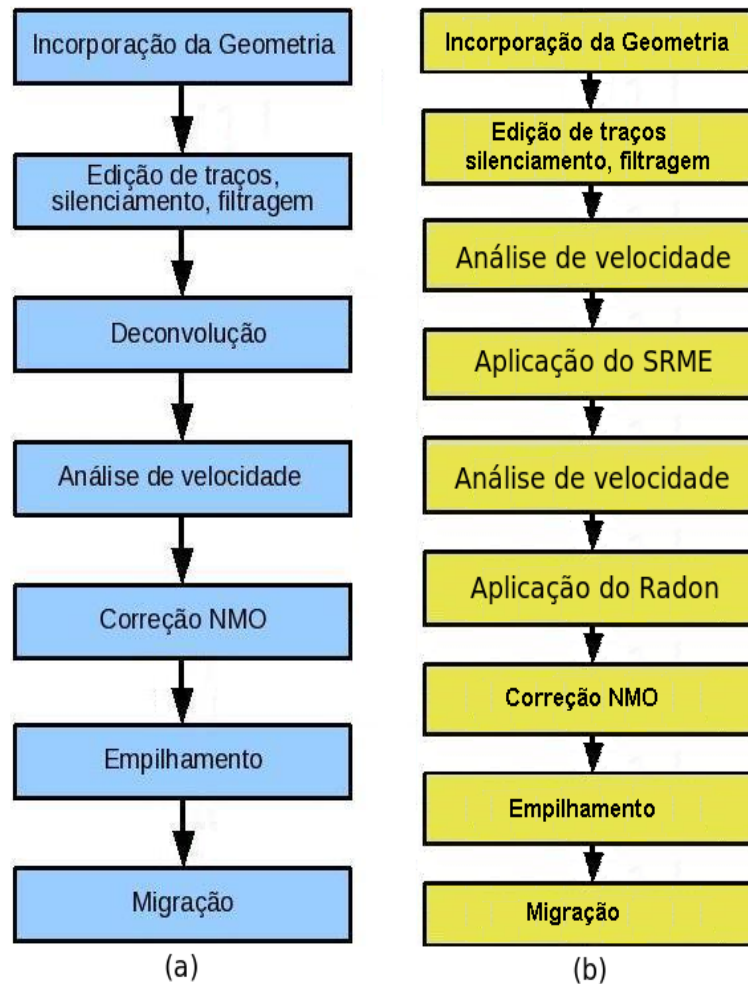


Figura 4.1: Fluxograma de processamento sísmico de dados 2D. a) Fluxo de um processamento convencional. b) Fluxo de processamento adicional utilizado neste trabalho (SRME seguido do Radon).

que consiste na compensação das perdas de amplitudes devido ao decaimento e absorção de energia dos materiais. Essa etapa do pré-processamento será aplicada somente no fluxo do processamento convencional, onde não será aplicado o método SRME.

4.2 PROCESSAMENTO

Constituído pela deconvolução, análise de velocidade, empilhamento e migração.

4.2.1 Deconvolução ao pulso sísmico

Após o pré-processamento, a próxima etapa é a deconvolução. A deconvolução comprime o sinal refletido e aumenta a resolução temporal do dado sísmico. A forma do sinal da fonte

ou assinatura da fonte é removida dos traços sísmicos, deixando somente a refletividade da Terra no traço sísmico.

A deconvolução também pode ser vista como um processo de filtragem, geralmente para atenuar as reflexões múltiplas (deconvolução preditiva). A suposição da deconvolução preditiva é que a função refletividade das reflexões primárias é aleatória. O processo descarta então os eventos não-aleatórios.

O sismograma registrado (traço) pode ser modelado através da convolução da resposta da Terra (função refletividade) com o pulso sísmico (*wavelet*). A deconvolução recupera a resposta da Terra a partir da operação inversa da convolução.

O conceito principal na qual está fundamentada a deconvolução é o “modelo convolucional” para geração dos traços sísmicos (YILMAZ, 2000). A Figura 4.2 mostra o modelo convolucional em tempo.

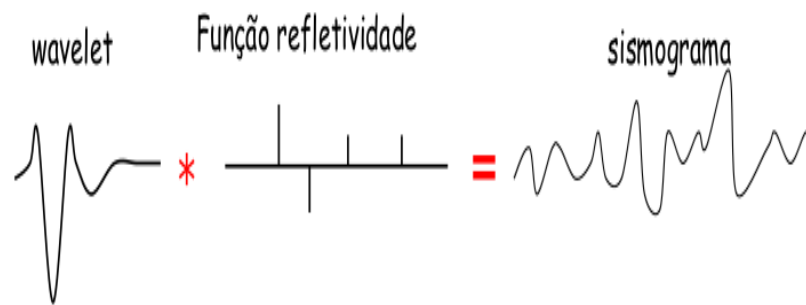


Figura 4.2: Modelo convolucional para geração de um sismograma em tempo.

Para o modelo convolucional são admitidas os seguintes pré-supostos:

- O meio é constituído por camadas horizontais com velocidades constantes;
- Na superfície, emite-se uma onda plana compressional que atinge a interface com ângulo de incidência normal;
- A forma do pulso sísmico ou sinal da fonte não muda durante sua propagação em sub-superfície (é estacionário);

No processamento convencional, as técnicas de deconvolução são baseadas no filtro Wiener, este converte o pulso para a forma que se desejar. O filtro Wiener pode ser projetado para converter um pulso sísmico em um impulso, a resolução da saída pode ser controlada projetando o parâmetro “erro da predição” do filtro Wiener. A deconvolução preditiva pode ser mais interessante quando há presença de reflexões múltiplas. O “erro da predição” no filtro

pode ser usado para remover as componentes periódicas das múltiplas. Ressaltando que a deconvolução ao pulso sísmico não será aplicadas no fluxograma 4.1 (b) para o tratamento das linhas , pois para a aplicação do SRME as informações da assinatura da fonte devem ser preservadas. Mais informações sobre deconvolução ao pulso sísmico pode ser encontrado em Yilmaz (2000).

4.2.2 Análise de velocidade

Na análise de velocidade procura-se determinar as velocidades sísmicas que melhor horizontalizem a hiperbóle da reflexão, o resultado da análise de velocidade é um campo de velocidades RMS⁴, que será usado no empilhamento para obter a seção sísmica.

Considerando-se uma única camada horizontal de velocidade constante, a curva de tempo de trânsito em função do afastamento fonte-receptor é uma perfeita hipérbola, dada por:

$$t_x^2 = t_0^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2, \quad (4.1)$$

em que, t_x representa o tempo (de trânsito) que a onda leva para viajar da fonte até a superfície refletora e depois até o receptor, x é a distância fonte receptor, t_0 é o tempo duplo de *offset* zero, tempo de trânsito que a onda teria se fonte e receptor estivessem na mesma posição ($x = 0$) e v a velocidade da camada.

Para um modelo de camadas horizontais planas, com velocidade constante, o tempo de trânsito é aproximado por uma hipérbola. Esta aproximação é mais precisa em pequenos afastamentos.

Para afastamentos mais curtos (*offset* menor que profundidade), as velocidades NMO⁵ e de empilhamento são similares à velocidade RMS. Entretanto, para refletores inclinados, estas velocidades são diferentes. As velocidades NMO ou RMS, fornecem, através de um processo de inversão, as chamadas velocidades intervalares (DIX). A velocidade intervalar é a velocidade média com a qual a onda se propaga em uma camada, ou seja, entre dois refletores.

O resultado (ou saída) da análise de velocidades é uma tabela que representa a função velocidade RMS, os valores com maior coerência de sinal no plano velocidade - tempo são selecionados. O método mais usado para esse tipo de análise é o semblance. A Figura 4.3 mostra um dos modelos de velocidades RMS utilizado neste trabalho, após a determinação dos *Picking*⁶ nos painéis de coerência.

⁴RMS: Abreviação de *Root-Mean-Square*, que significa: Velocidade Média Quadrática (valor eficaz).

⁵NMO: Sobretempo Normal (Do inglês *Normal Moveout*).

⁶Picking: Palavra de origem inglesa amplamente difundida no meio sísmico, significando colheita.

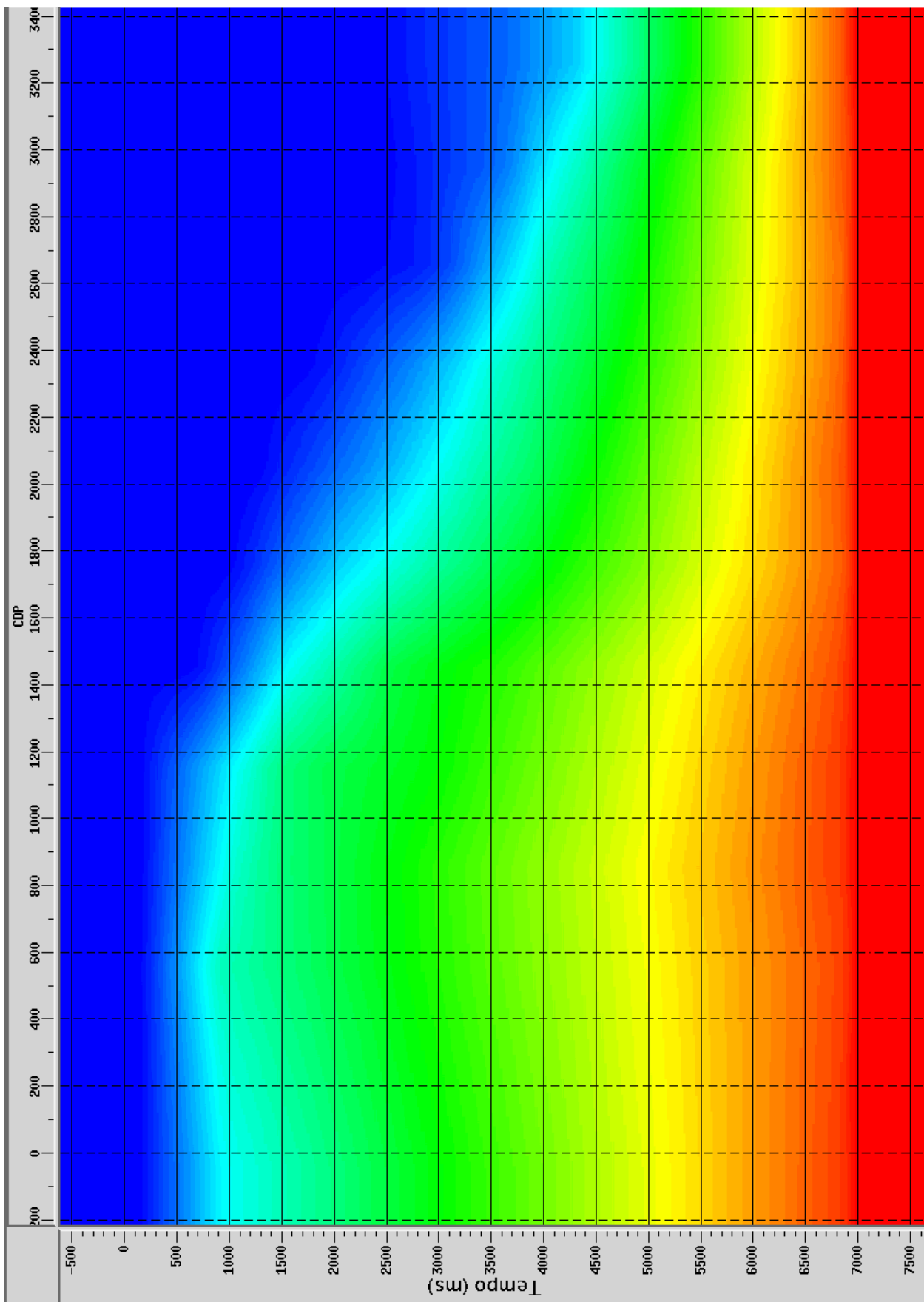


Figura 4.3: Visualização do modelo de velocidades RMS da Linha sísmica 66.

4.2.2.1 Correção NMO

A correção do NMO é dada pela diferença entre o tempo de reflexão em um dado afastamento t_x e o tempo de afastamento nulo t_0 , ou seja, os traços são corrigidos em tempo, a saber,

$$\Delta t_{NMO} = t_x - t_0, \quad (4.2)$$

ou ainda:

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{v_{NMO}} \right)^2} - 1 \right] \quad (4.3)$$

Esta correção faz com que os eventos sejam virtualmente horizontalizados ao longo do eixo dos afastamentos. Hipoteticamente fontes e receptores são agrupados em um único ponto da superfície do terreno, correspondente as coordenadas de uma determinada família CMP. A Figura 4.4 ilustra as considerações acima citadas. A correção NMO é o critério matemático principal para reconhecer um evento de reflexão (TELFORD, 1990).

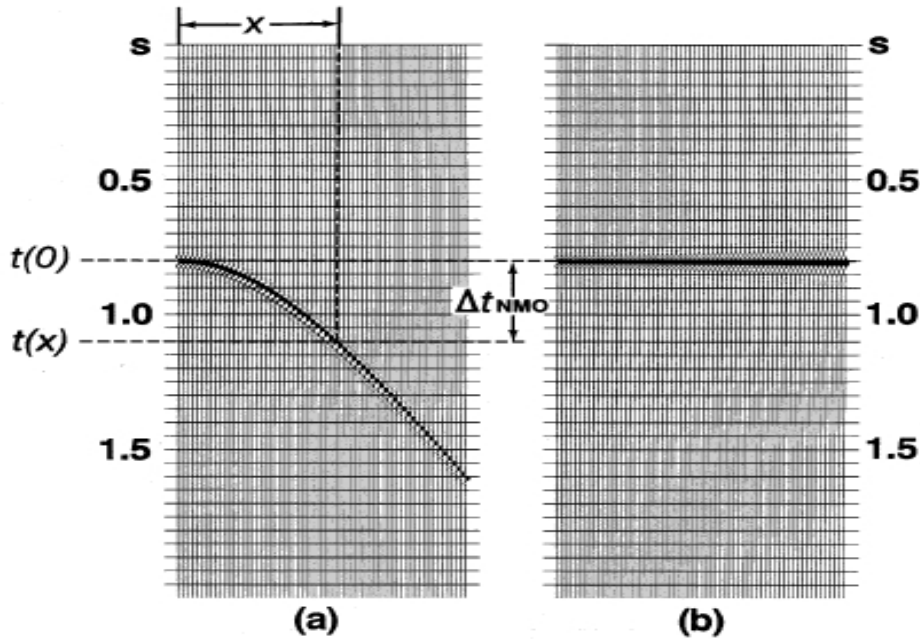


Figura 4.4: Correção do tempo de trânsito. (a) Antes da correção NMO. (b) Depois da correção NMO.

Fonte: Yilmaz (2000).

Para dois meios homogêneos representado por refletores planos, a hipérbole da reflexão pode ser corrigida de forma satisfatória se a velocidade do meio acima do refletor for determinada de forma coerente, a Equação 4.3 descreve essa hipérbole. No entanto, se a velocidade for maior que a do meio, a hipérbole não será completamente horizontalizada e o evento é chamado de sub-correção. Contudo, se uma velocidade for menor que a do meio, então ocorre

a Sobre-correção (YILMAZ, 1987).

Devido a correção NMO, os traços são estirados, este estiramento aumenta nos tempos rasos e em afastamento grandes. Para impedir a degradação, especialmente nos eventos rasos, a área estirada deve ser silenciada antes do empilhamento

4.2.3 Empilhamento

Depois da correção NMO, somam-se os traços ao longo do eixo dos afastamentos resultando em um único traço idealizando o registro da Afastamento Nulo⁷ para aquela família CMP em particular, este processo é denominado empilhamento sísmico e se destina a aumentar a relação sinal/ruído (S/R). No entanto, existe uma dependência entre a relação Sinal/Ruído (S/R) e o silenciamento. Se relação S/R é boa então é recomendado silenciar mais do que a área estirada requerida para preservar a largura do sinal. Por outro lado, se a relação S/R é pobre, pode ser necessário aceitar um aumento no estiramento para obter uma maior quantidade de traços a serem somados no empilhamento. A Figura 4.5 mostra os traços em família CMP, corrigidos de NMO, depois do silenciamento e empilhado na posição correspondente ao referido CMP.

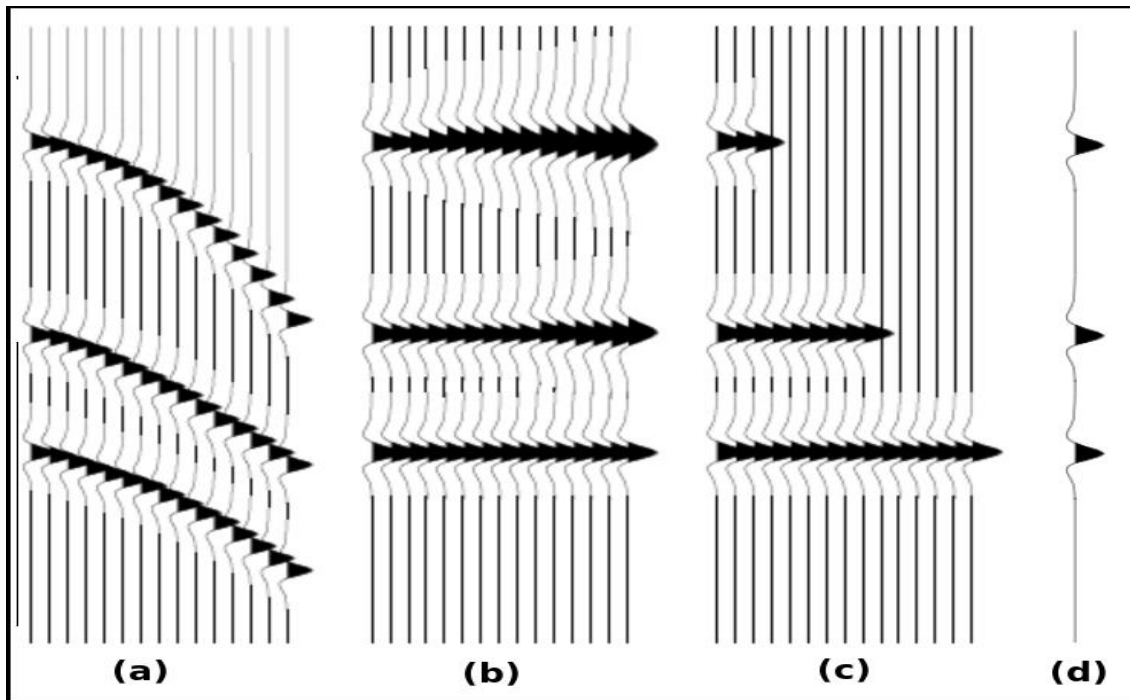


Figura 4.5: (a) Família de CMP. (b) Aplicada a correção NMO. (c) Posterior silenciamento. (d) traços empilhado simulando afastamento nulo.

Fonte: Adaptado de Gamboa (2007).

⁷Afastamento Nulo: Do inglês *Zero Offset (ZO)*.

4.2.4 Migração

A migração localiza os eventos nas suas verdadeiras posições espaciais além de colapsar difrações, aumentando assim a resolução espacial e gerando uma imagem final confiável (semelhante) da subsuperfície. Dados empilhados contêm difrações e imagens distorcidas dos refletores em profundidade; a migração visa corrigir difrações e o mergulhos de refletores, para posiciona-los em suas "posições verdadeiras", isso é denominado migração pós-empilhamento. Existem diferentes tipos de migração; neste trabalho restringimos a migração pós-empilhamento em tempo, o chamado método *Kirchhoff*, que se baseia na soma (empilhamento) de tempo de trânsito de difração.

A migração em tempo transforma os dados sísmicos registrado em tempo em seções, também no domínio do tempo, fazendo com que as estruturas se pareçam bem mais com aquelas existentes em subsuperfície. Essa metodologia é mais fácil de ser realizada e demanda menos esforço computacional, quando comparada com a migração em profundidade. Uma outra razão é que intérpretes preferem avaliar a validade da seção migrada comparando-a com os dados não migrados. Esta migração utiliza os dados organizados em afastamento nulo (traços empilhados). Essa geometria de levantamento naturalmente não pode ser realizada na prática. Considera então uma geometria de levantamento alternativa, o modelo dos refletores explosivos⁸, que irá gerar a mesma seção sísmica.

O resultado da seção sísmica deste modelo é equivalente a seção de afastamento nulo. No entanto, na seção de afastamento nulo é gravado o tempo de trânsito duplo (fonte – ponto de reflexão – receptor), enquanto que, no modelo de refletor explosivo é registrado o tempo de trânsito simples (do ponto de reflexão onde a fonte está localizada ao receptor). Para tornar as seções compatíveis, pode-se imaginar que a velocidade de propagação é metade do valor da velocidade real do meio para o modelo de refletor explosivo. A equivalência entre a seção de afastamento nulo com a do modelo de refletor explosivo não é exata, particularmente em presença de fortes variações laterais (KJARTANSSON; ROCCA, 1979). Contudo, o método *Kirchhoff*, para migração pós-empilhamento em tempo, é o mais amplamente utilizado, pois mesmo em meios com variação lateral de velocidades ainda fornece bons resultados e é eficiente computacionalmente. A migração *Kirchhoff* é apresentada por (SCHNEIDER, 1978) para a solução integral da equação escalar da onda. Esse método utiliza os tempos de trânsito e as amplitudes dos eventos sísmicos, calculados a partir da teoria do raio.

⁸Considere fontes explosivas localizadas ao longo da interface refletora (LOEWENTHAL; SHERWOOD, 1976). Considerando também um receptor localizado na superfície para cada CMP ao longo da superfície. As fontes explosivas são acionadas conjuntamente e as ondas são propagadas para cima sendo registradas pelos receptores na superfície.

4.3 PROCESSAMENTO ADICIONAL

Reflexões múltiplas podem ser definidas como eventos sísmico que sofreram mais de uma reflexão ascendente (Figura 4.6). Em levantamentos sísmicos marinhos o maior responsável pela geração de múltiplas consiste na superfície livre da lâmina d'água (superfície do mar).

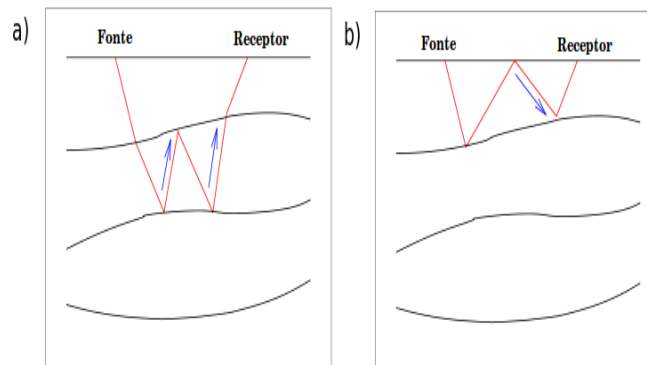


Figura 4.6: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla. (a) Evento sísmico com duas reflexões ascendentes e (b) uma reflexão descendente na superfície livre.

As reflexões múltiplas estão relacionadas a quantidade de energia que a mesma possui e entre quais camadas essa energia está agindo. As múltiplas de superfície livre se originam nas interfaces Terra/água e água/ar, causada pelas grandes diferenças de impedância entre essas interfaces, ou seja, quanto maior for o contraste de impedância entre as interfaces envolvidas, mais fortes serão as múltiplas geradas. A Figura 4.7 apresenta um modelo esquemático de uma possível reflexão múltipla relacionada a superfície livre.

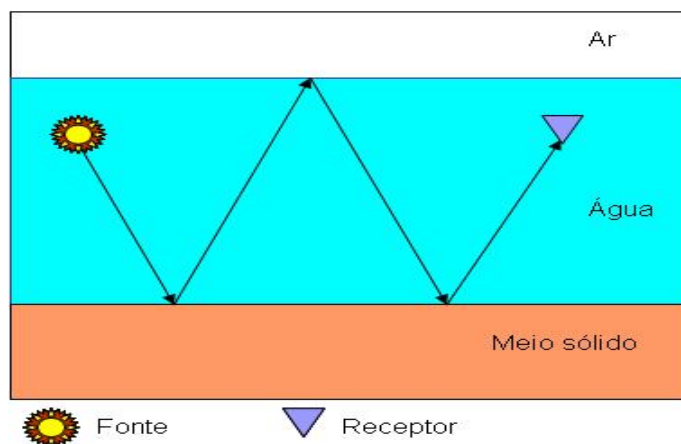


Figura 4.7: Esquema mostrando a trajetória do raio associada a múltipla de superfície livre.
Fonte: Mendonça (2009).

Essas reflexões múltiplas estão entre os mais sérios problemas encontrados em levantamentos sísmicos, uma vez que, elas podem ocorrer ao mesmo tempo e com a mesma banda

de frequência que as reflexões primárias de interesse, ocasionando interpretações falsas. No processamento sísmico as múltiplas causam sérios problemas na análise de velocidade e migração. Desta forma, há a necessidade de atenuação e se possível a eliminação de tais eventos em um processamento sísmico. Vários estudos tem sido realizados abordando as reflexões múltiplas e as técnicas para remoção. Algumas das técnicas mais importantes utilizadas na indústria são: Deconvolução Preditiva, Filtragem f-k, Transformada Radon e SRME.

O processamento adicional desenvolvido neste trabalho consiste basicamente na aplicação do método SRME seguido de filtragem Radon. A filtragem Radon será aplicada como uma etapa adicional com o objetivo de obter melhores resultados juntamente com o SRME, devido ao fato da aplicação do SRME a dados com pequenos afastamentos não apresenta bons resultados (VERSCHUUR; BERKHOUT; WAPENAAR, 1992).

4.3.1 Método de eliminação de reflexões múltiplas relacionadas a superfície (SRME)

Em princípio, os métodos de atenuação de múltiplas relacionadas com a superfície livre consistem na retirada do efeito da superfície refletora, através da simulação de uma superfície de reflexão nulo (KENNETT, 1979), apud (VERSCHUUR, 1990).

O chamado SRME, é um método baseado na periodicidade das múltiplas, onde é feita a predição das múltiplas e posteriormente sua subtração dos dados. Segundo Vershuur (2006), este método assume que o campo de onda para a reflexão primária de superfície livre possui um *moveout* equivalente a uma viagem de ida e volta do campo de onda na camada d'água, acima desta trajetória, o campo de onda estaria relacionado as reflexões com fontes ou receptores fantasmas (*ghost*) ou a múltiplas de ordens mais altas como observado na Figura 4.8.

O SRME apresenta melhor performance em dados com grandes *offset's*. Segundo Ferreira (2009) Este método possui como principal vantagem a característica de não interferir na energia das reflexões primárias, além da possibilidade de ser aplicado em modelos com geometria do fundo-do-mar complexa, onde métodos simples não bastam. Em situações onde temos forte contraste entre a interface água/fundo oceânico, ou onde os alvos se encontram com o tempo acima de 2s (profundos), este método pode ser melhor aplicado. Contudo em pequeno afastamento onde é difícil a distinção entre múltiplas e primárias, quando essas velocidades se encontrarem próximas esse método não apresenta bom resultado.

Idealmente a trajetória das ondas seria uma viagem até a subsuperfície, uma interação com cada superfície refletiva (reflexões primárias), seu retorno à superfície e sua direta captação nos receptores. Porém, isto não acontece e o que fica registrado deve ser deconvolvido com a assinatura da fonte, para desta forma, podermos obter a resposta da subsuperfície.

Adotaremos uma notação matricial para apresentar a descrição matemática do método, onde as matrizes serão indicada por uma letra maiúscula e um acento acima. O conjunto de equações que descrevem todo o processo foi proposto por (VERSCHUUR; BERKHOUT; WAPENAAR, 1992).

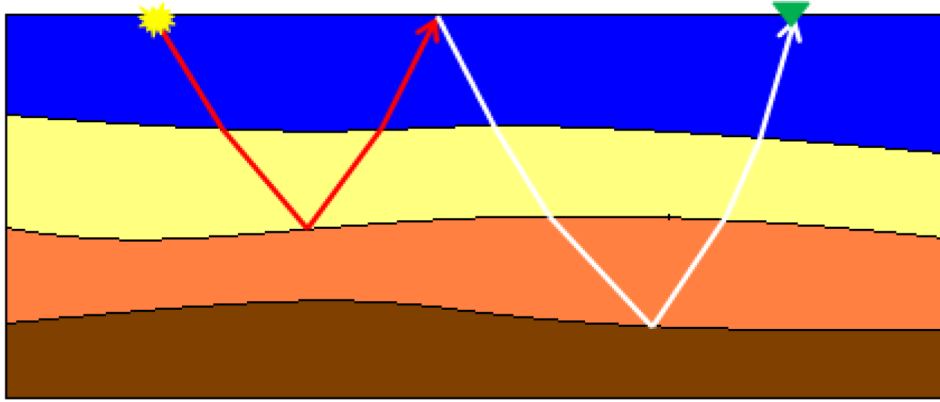


Figura 4.8: Construção da múltipla de primeira ordem relacionada à superfície através da junção de reflexões primárias segundo Verschuur (2006).

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

Considerando o campo de pressão medido nos receptores em um meio acústico,

$$\tilde{P}_0^-(z_0) = \tilde{X}_0(z_0)\tilde{S}^+(z_0) \quad (4.4)$$

sendo que, $\tilde{P}_0^-(z_0)$ a matriz campo de pressão; $\tilde{X}_0(z_0)$ a matriz resposta da subsuperfície; \tilde{S}^+ a assinatura da fonte; a referência z_0 indica que o dado é em função da profundidade.

Considerando também que, $\tilde{X}_0(z_0)$ contém tanto ondas Ascendentes⁹ quanto ondas Descendentes¹⁰, e considerando o fato de que ondas ascendentes refletem na superfície livre e transformam-se em descendente, o total do campo de onda descendente não consiste apenas nas ondas provenientes da fonte \tilde{S}^+ , como também destas ondas transformadas pela superfície livre, o que modifica Equação 4.4 para:

$$\tilde{P}^-(z_0) = \tilde{X}_0(z_0) [\tilde{S}^+ + \tilde{R}^-(z_0)\tilde{P}^-(z_0)] \quad (4.5)$$

Adotando $\tilde{R}^-(z_0)$ como a matriz refletividade à superfície livre. A expressão explícita para o total de ondas ascendentes do campo de onda na superfície inclusive múltiplas relacionadas à superfície pode ser derivada da Equação 4.5.

$$\tilde{P}^-(z_0) = \frac{\tilde{X}_0(z_0)\tilde{S}^+}{I - \tilde{X}_0(z_0)\tilde{R}^-(z_0)} \quad (4.6)$$

Pela definição $\tilde{X}(z_0)$ a resposta da subsuperfície incluindo reflexões múltiplas relacionadas à superfície livre e I, a matriz identidade.

⁹Ondas ascendentes: Ondas *Upgoing* indicadas pelo símbolo negativo (-).

¹⁰Ondas descendentes: Ondas *downgoing* indicadas pelo símbolo positivo (+).

A matriz inversa na Equação 4.6 pode ser expandida em uma série, o que resulta em:

$$\tilde{P}^-(z_0) = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \tilde{X}_0(z_0) \tilde{R}^-(z_0)^n \right] X_0(z_0) \tilde{S}^+(z_0) \quad (4.7)$$

Comparando a Equação 4.7 com Equação 4.4 verificamos que os termos extras na Equação 4.7 estão relacionados a todas múltiplas de superfície. Para pressão acústica de superfície livre (caso marinho), a refletividade matriz $\tilde{R}^-(z_0)$ é simplificada para:

$$\tilde{R}^-(z_0) = r_0 \tilde{I} \quad (4.8)$$

em que idealmente $r_0 = -1$ é o valor próximo ao coeficiente de reflexão da interface água/ar. Tomando a matriz de reflexão como uma matriz (peso) unitária, é exigido que fonte e receptor estejam localizados em um gride equidistante.

Utilizando a Equação 4.8, a Equação 4.6 é simplificada para:

$$\tilde{P}^-(z_0) = \frac{\tilde{X}_0(z_0) \tilde{S}^+}{I - r_0 \tilde{X}_0(z_0)} \quad (4.9)$$

A partir da inversão da Equação 4.5, podemos gerar uma expressão $\tilde{X}_0(z_0)$ para remover múltiplas dos dados do campo de pressão $\tilde{P}^-(z_0)$.

$$\tilde{X}_0(z_0) = \frac{\tilde{P}^-(z_0)}{\tilde{S}^+ z_0 \tilde{R}^-(z_0) \tilde{P}^-(z_0)} \quad (4.10)$$

ou, usando a Equação 4.4

$$\tilde{X}_0(z_0) = \frac{\tilde{X}(z_0)}{I + \tilde{R}^-(z_0) \tilde{X}(z_0)} \quad (4.11)$$

A matriz inversa dessa equação pode ser escrita como a seguinte expansão de série:

$$\tilde{X}_0(z_0) = \tilde{X}(z_0) \left[I - \{ \tilde{R}_0^-(z_0) \tilde{X}(z_0) \} + \{ \tilde{R}_0^-(z_0) \tilde{X}(z_0) \}^2 - \{ \tilde{R}_0^-(z_0) \tilde{X}(z_0) \}^3 + \dots \right]. \quad (4.12)$$

Tomando apenas um número limitado de termos em conta na Equação 4.12 estabiliza-se a inversão. O número de termos que deve se levar em conta depende da ordem das reflexões múltiplas relacionada á superfície, porque cada termo adicional tomado em conta na equação resulta em eliminar múltiplas relacionadas à superfície livre de uma ordem mais alta.

Usando a Equação 4.8, a Equação 4.12 torna-se:

$$\widetilde{X}_0(z_0) = \widetilde{X}(z_0) - r_0 \widetilde{X}(z_0)^2 + r_0^2 \widetilde{X}(z_0)^3 - r_0^3 \widetilde{X}(z_0)^4 + \dots \quad (4.13)$$

Nas Equações 4.12 e 4.13 não modelamos a subsuperfície. Apenas os dados sísmicos para a fonte do campo de onda, isto é $X(z_0)$ é a propriedade de refletividade da superfície livres, o escalar r_o , é usado. De fato, os dados propriamente são usados como operador de predição de múltipla. Aparentemente, os dados contêm toda informação necessária sobre a subsuperfície para predizer as múltiplas.

Substituindo a Equações 4.4 na Equação 4.13 temos:

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_0^-(z_0) = \widetilde{P}^-(z_0) - r_0 \left\{ \widetilde{P}^-(z_0) \widetilde{S}^+(z_0)^{-1} \right\} \widetilde{P}^-(z_0) + r_0^2 \left\{ \widetilde{P}^-(z_0) \widetilde{S}^+(z_0)^{-1} \right\}^2 \widetilde{P}^-(z_0) - \\ r_0^3 \left\{ \widetilde{P}^-(z_0) \widetilde{S}^+(z_0)^{-1} \right\}^3 \widetilde{P}^-(z_0) + \dots \end{aligned} \quad (4.14)$$

Assume-se para o momento que a fonte do campo de onda pode ser escrito como:

$$\widetilde{S}^+(z_0) = S(\omega) \widetilde{I} \quad (4.15)$$

com $S(\omega)$ como a frequência dependente da assinatura da fonte. Isso significa que a suposição é feita que um ângulo que depende da deconvolução para a fonte, e que as fontes residuais consistem de idênticos pontos fontes cada uma com assinatura $S(\omega)$. Note que uma fonte diagonal da matriz é definida na Equação 4.15, implica na pressão de fonte dipolar, como explicado em (BERKHOUT, 1982).

Utilizando as Equações 4.14 e 4.15,

$$\widetilde{P}_0^-(z_0) = \widetilde{P}^-(z_0) - A(\omega) \left[\widetilde{P}^-(z_0) \right]^2 + A(\omega)^2 \left[\widetilde{P}^-(z_0) \right]^3 - A(\omega)^3 \left[\widetilde{P}^-(z_0) \right]^4 + \dots \quad (4.16)$$

onde,

$$A(\omega) = \frac{r_0}{S(\omega)} \quad (4.17)$$

Utilizamos a Equação 4.16 para eliminação de múltiplas de simples componente. Note que na referida equação, o primeiro termo $\widetilde{P}^-(z_0)$ não é afetado por $A(\omega)$. Isto significa que a primárias são preservadas durante o procedimento de otimização. Depois de otimizada a função $A(\omega)$ é estimada, e pode ser usada para a deconvolver os dados primários.

Na Equação 4.16, cada termo depois do $\widetilde{P}^-(z_0)$ é relativo a uma reflexão múltipla de superfície livre, onde o 2º termo da equação corresponde a uma reflexão múltipla de 1ª ordem, o 3º termo da equação corresponde a uma múltipla de 2ª ordem, e assim sucessivamente.

4.3.2 Transformada Radon

A Transformada Radon distingue as múltiplas das primárias com base na diferença entre os *moveouts* que esses eventos apresentam. Ela transforma os dados para o domínio *time-moveout*, no qual as múltiplas e as primárias podem ser separadas. Segundo Verschuur (2006), neste domínio, pode-se anular a energia das primárias. Ao retornar para o domínio espaço-tempo apenas com as múltiplas (utilizando a técnica de inversão dos Mínimos Quadrados), algumas distorções e artefatos¹¹ que podem ser gerado não iriam interferir na enegia inicial das primárias quando fosse realizado a subtração deste dado com o original (primária e múltiplas). Essa Transformada é aplicada aos dados na configuração CMP e com correção NMO. Um dos benefícios desta técnica é o fato de que ela não requer nenhum conhecimento das interfaces que geraram as múltiplas, ela atenua as múltiplas em todos os afastamentos (GAMBOA, 2003).

A definição matemática da Transformada Radon é dada por:

$$T(p, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} d(x, t = px + \tau) dx, \quad (4.18)$$

Esta equação descreve um procedimento de mapeamento no qual o dado no domínio do espaço-tempo é somado ao longo de linhas oblíquas, em que p é o parâmetro de raio (inclinação) e τ , é o tempo de intercepção.

Existem três formas de Transformadas Radon aplicadas no processamento sísmico, estas são:

- Transformada Radon Linear;
- Transformada Radon Hiperbólica;
- Transformada Radon Parabólica.

Transformada Radon Parabólica

Neste trabalho usamos a Transformada na forma parabólica devido assumimos que a múltipla tem forma parabólica após a correção NMO. A Transformada de Radon Parabólico mapeia evento sísmicos com *moveout* parabólico no domínio espaço-tempo ($t - x$) para um ponto enfocado no domínio tempo-parâmetro de raio ($\tau - p$) como podemos ver na Figura 4.9.

A Transformada de Radon na forma parabólica pode ser construída na correção NMO das famílias CMP somando o dado ao longo das trajetória empilhadas definida pela Equação 4.19 (VERSCHUUR, 2006).

$$T(\tau, p) = \int_{-\infty}^{\infty} d(x, t = \tau + qx^2) dx \quad (4.19)$$

¹¹Eventos ou feições falsas que podem aparecer em um levantamento geofísico (DUARTE, 2003).

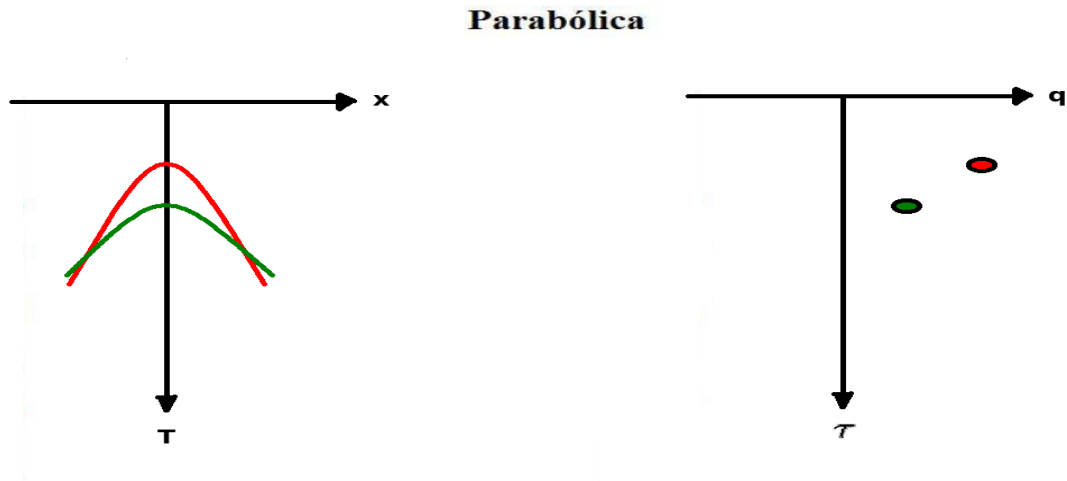


Figura 4.9: O Filtro Radon concentra a energia dos eventos parabólicos do domínio espaço-tempo ($t - x$) em regiões diferentes no domínio $\tau - p$. Quando o evento possui seu ponto de máximo valor em $x = 0$, o tempo de intercepção (τ) é definido como a posição (em tempo) do ápice da parábola no domínio do espaço-tempo.

Fonte: Adaptado de Verschuur (2006).

No qual q é o parâmetro de curvatura que define a trajetória da parábola descrita na Equação 4.19. Para maiores informações sobre a Filtragem Radon o leitor pode consultar Yilmaz (2001).

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos ao longo da construção de um fluxo¹ para atenuação das múltiplas de superfície livre nas linhas 66 e 97 do Jequitinhonha.

Todas seções a seguir são mostrada a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre o intervalo que varia do CDP 1291 ao CDP 3270 da linha 66 e do intervalo que varia do CDP 1969 ao CDP 120 da linha 97, pois nessa região verificamos que pode ser realizada uma distinção do sinal/ruído, com base principalmente na propriedade de periodicidade das múltiplas de superfície livre. Em ambas as linhas, antes da quebra da plataforma continental que condiz com a parte rasa das seções, observamos que não houve resultados significativos para a metodologia utilizada. Neste caso, essa região não são analisada neste trabalho.

Nos dois primeiros conjuntos de figuras são mostradas as seções sísmicas da linhas 66 e 97 respectivamente organizadas em afastamento comum, para o afastamento de 150 m, apenas para efeito de comparação com os resultados obtidos com as etapas de SRME e Radon. No primeiro conjunto de figuras são mostradas as seções da linha 66 mostrada primeiramente a seção no estado bruto, Figura 5.1, em seguida as seção apenas com o SRME, Figura 5.2, depois apenas com o Radon, Figura 5.3, por último a seção com o SRME + Radon, Figura 5.4, de acordo com o fluxo mostrado na Figura 4.1 (b) e sugerido em (MENDONÇA, 2009). No segundo conjunto de figuras são mostradas as seções sísmicas da linha 97 na mesma configuração da linha 66, primeiramente no estado bruto Figura 5.5, em seguida a seção apenas com o SRME, Figura 5.6, depois apenas com o Radon, Figura 5.7, por último a seção com o SRME + Radon, Figura 5.8. A combinação do SRME seguido de Radon foi que apresentou melhor resultado para remoção de múltiplas de superfície livre, quando comparadas com as seções anteriores.

Nos dois últimos conjuntos de figuras ilustrado abaixo, são apresentadas as seções migradas em tempo das respectivas linhas 66 e 97, onde é possível visualizar possíveis eventos em suas verdadeiras posições em subsuperfície. Como nos dois primeiro conjunto, são mostrado o conjunto de figuras da linha 66, primeiramente no estado bruto. Em seguida mostra a seção apenas com o SRME. Depois apresenta a figura apenas com o Radon. A próxima figura mostra a seção com o SRME + Radon, de acordo com o fluxo mostrado na Figura 4.1 (b) e sugerido em (MENDONÇA, 2009). Por último, mostra a seção somente com o processamento convencional. Posteriormente é mostrado o conjunto de figuras da linha 97 na mesma configuração da linha 66.

Com objetivo de comparação, essas linhas são também submetidas ao processamento convencional de acordo com o fluxo mostrado na Figura 4.1 (a), onde não há aplicação de

¹Ressaltando que as seções submetidas ao SRME não foram aplicadas a correção de amplitude e a deconvolução, pois para a aplicação do SRME as amplitudes do sinal devem ser preservadas.

metodologia específica para atenuação das múltiplas.

- Nas Figuras 5.10 e 5.10 apenas com o SRME da linha 66 e 97 respectivamente, verifica-se que houve uma significativa atenuação da múltipla de superfície livre na região mais profunda das seções sísmicas, mais precisamente no tempo entre 4500 e 5000 ms, entre os CDP's CDP 1979 ao 3270 da linha 66 e no tempo entre 1500 a 4000 ms no intervalo que varia do CDP 1447 ao 120 da linha 97, nessas regiões o SRME apresenta melhor resultado devido ao grandes afastamentos. Enquanto que, na região mais rasa entre os CDP's 1291 a 1978 da linha 66 e entre os CDP's de 1969 a 1446 da linha 97, não observamos mudanças tão significativas, quando comparadas com as figuras anteriores em afastamento comum de 150 ms e também quando comparada a as seções no estado bruto migrada visualizada nas Figuras 5.9 e 5.14 das respectivas linhas 66 e 97.
- Nas Figuras 5.11 e 5.16 são mostradas as seções apenas com o Radon, nestas seções o resultado foi inverso ao do SRME, o Radon apresentou melhor desempenho na parte mais rasa das seções entre os CDP's 1291 a 1978 da linha 66 e os CDP's 1969 a 1446 da linha 97, já na parte mais profunda das seções no intervalo que varia do CDP 1979 ao 3270 da linha 66 e do CDP 1447 ao 120 da linha 97 o Radon não apresentou bons resultados.
- Nas Figuras 5.12 e 5.17, são apresentadas as seções após a submissão do SRME juntamente com a filtragem Radon das linhas 66 e 97 respectivamente, de acordo com o fluxograma 4.1 (b) em amarelo. Essas seções foram as que apresentaram melhores desempenho ao final do trabalho acordo com o sugerido em (MENDONÇA, 2009). E o resultado é comparado as seções submetidas ao processamento convencional de acordo com o fluxo mostrado na Figura 4.1 (a), onde não há aplicação de metodologia específica para atenuação das múltiplas, visualizada nas Figuras 5.18 e 5.18. Neste domínio o SRME é aplicado com sucesso na parte mais profunda das seções, mais precisamente no tempo entre 4500 e 5000 ms, entre os CDP's CDP 1979 ao 3270 da linha 66 e no tempo entre 1500 a 4000 ms no intervalo que varia do CDP 1447 ao 120 da linha 97, onde o método apresenta bom desempenho, devido os grandes *offset's*. Na parte rasa das seções entre os CDP's 1291 a 1978 da linha 66 e entre os CDP's de 1969 a 1446 da linha 97, o SRME não apresenta bons resultados, devido aos pequenos afastamentos, a aplicação do filtro Radon ajudou nessa parte rasa da bacia, apresentando melhor desempenho que o SRME e vice-versa.

O uso conjunto dos métodos mostrou-se bastante eficaz para atenuação das múltiplas de superfície livre, quando comparado ao fluxo de processamento convencional; o SRME apresentou melhor desempenho na parte profunda e o Radon na parte rasa da bacia. Apesar dos resultados serem considerados satisfatórios, verifica-se que não houve uma significativa supressão de múltiplas, em especial, na parte rasa da bacia. Para as pesquisas posteriores, sugere-se que sejam testado outras metodologias necessárias para atenuação e se possível remoção das múltiplas nessa região, com o objetivo de obter melhores resultados, podendo utilizar informações contidas neste trabalho.

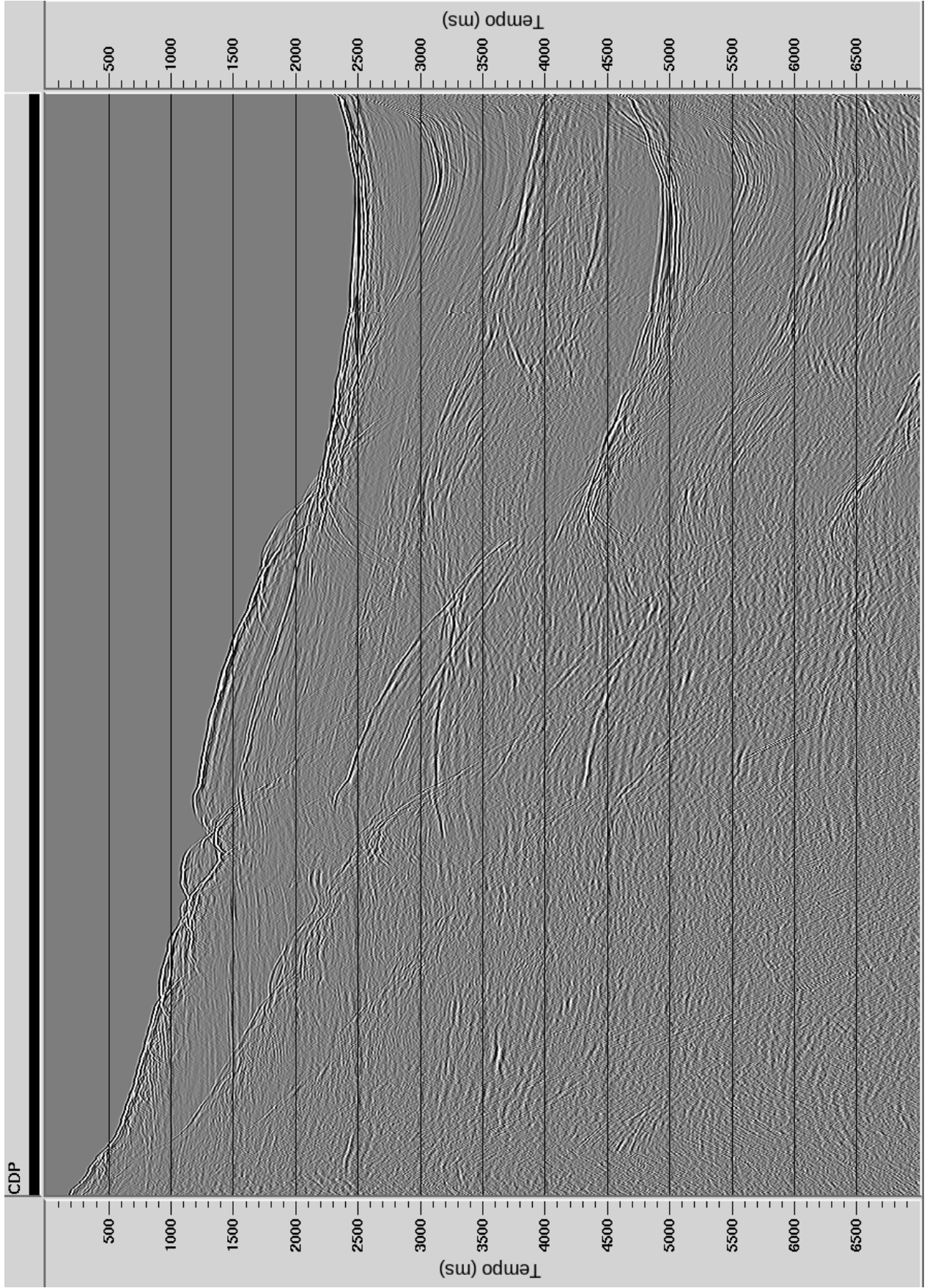


Figura 5.1: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 do dado no estado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.

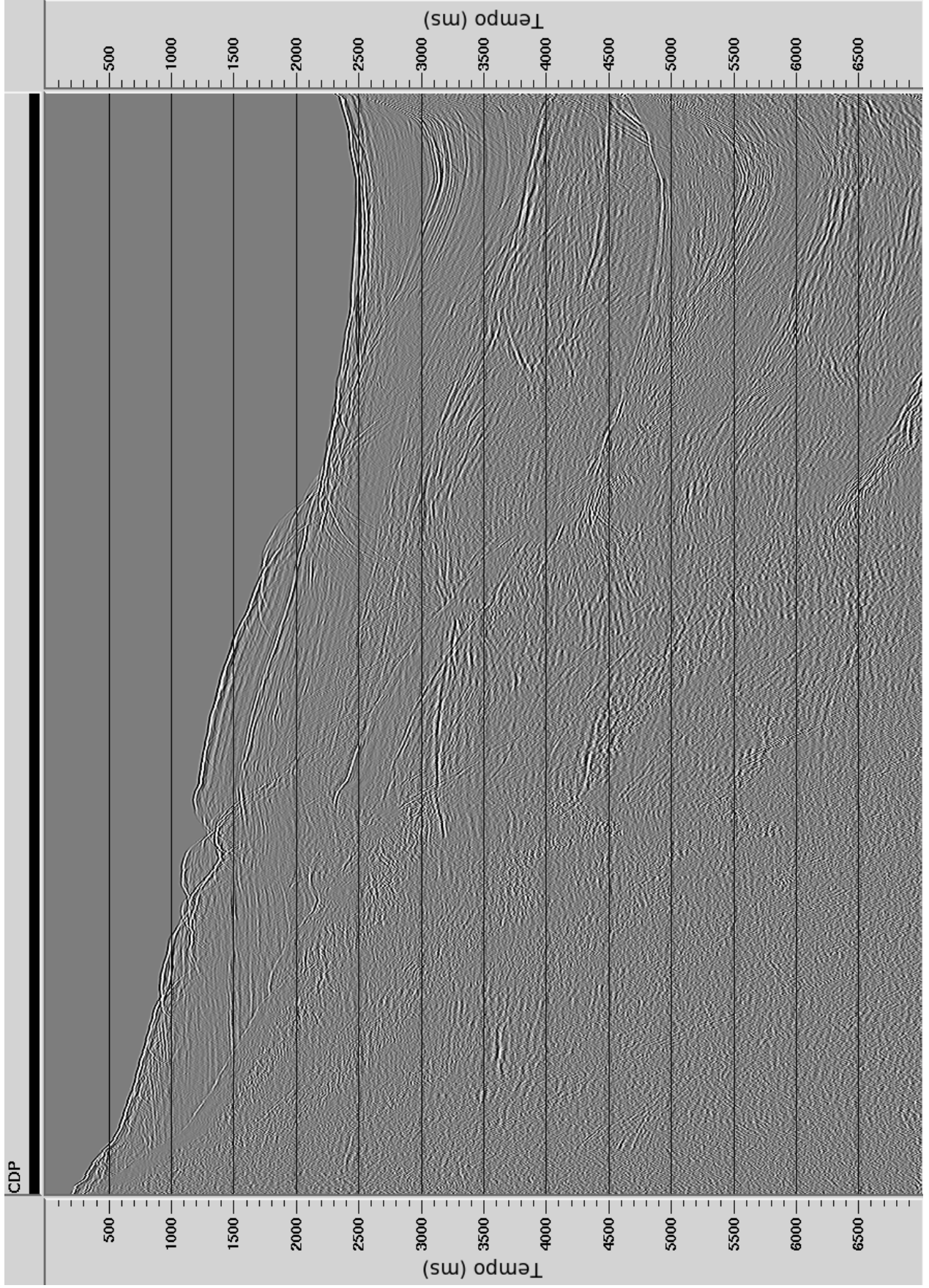


Figura 5.2: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 apenas com o SRME organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.



Figura 5.3: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 apenas com o Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.



Figura 5.4: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 com o SRME seguido do Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 66.

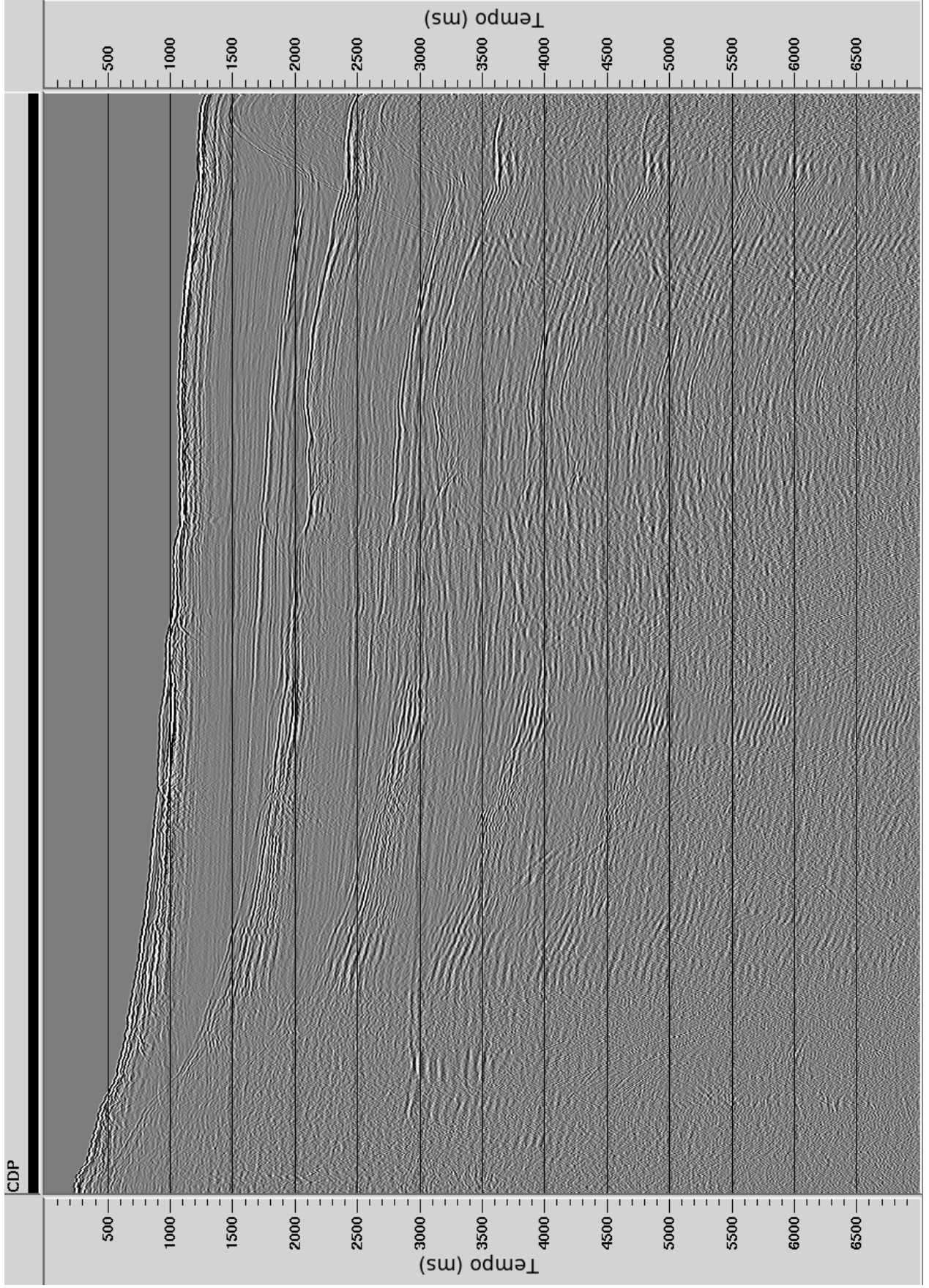


Figura 5.5: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 do dado no estado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.

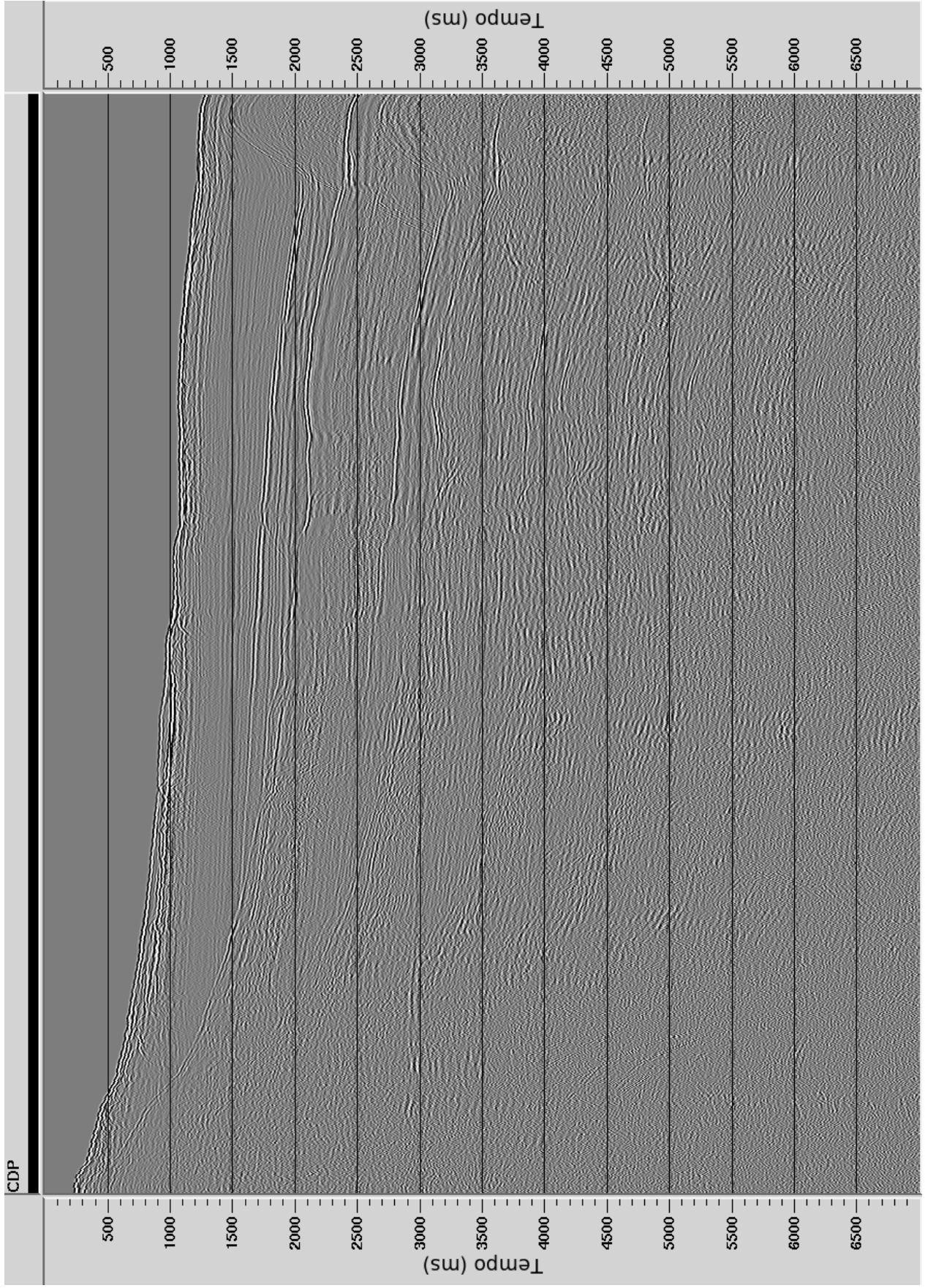


Figura 5.6: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 apenas com o SRME organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.

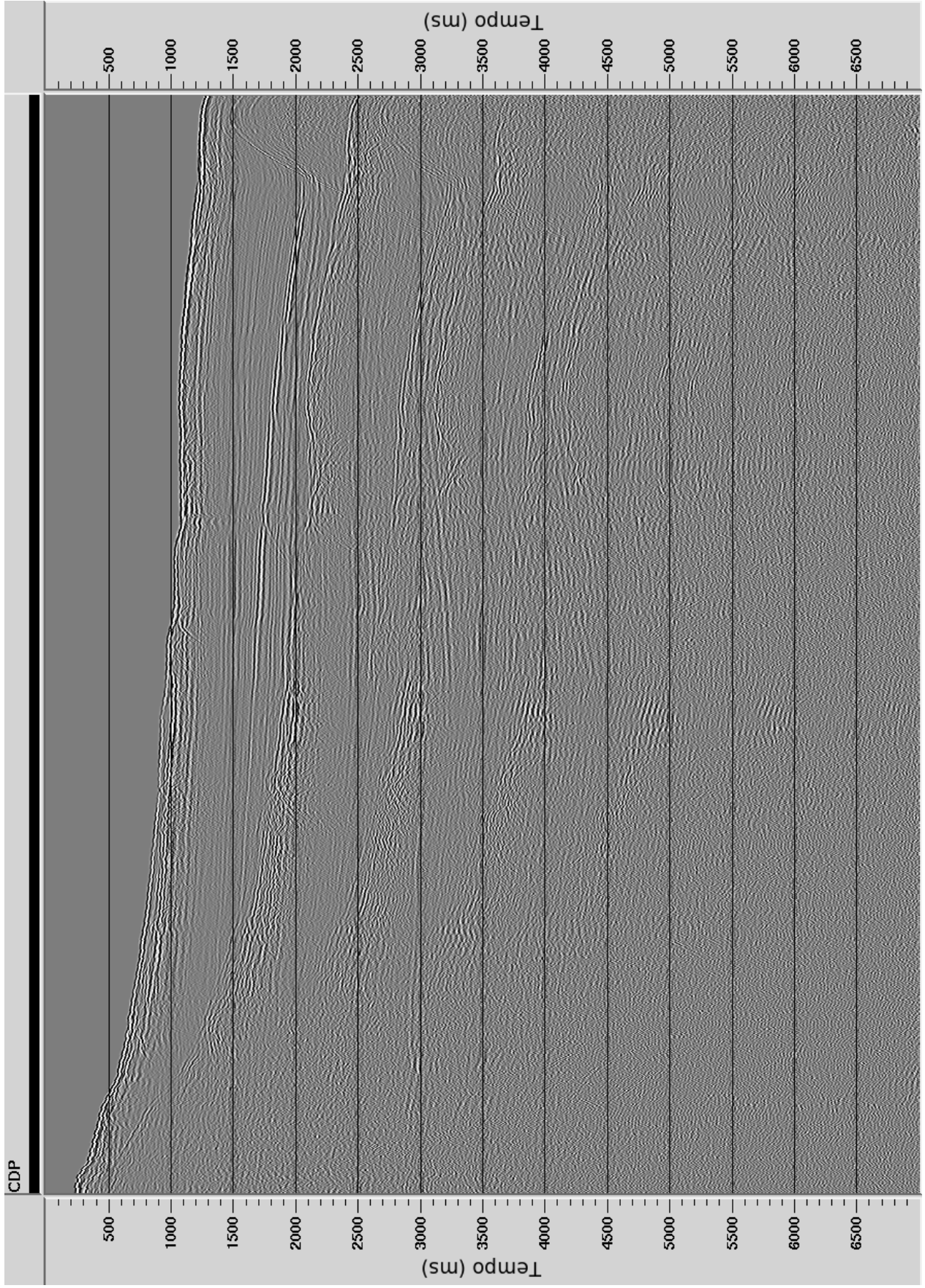


Figura 5.7: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 apenas com o Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.

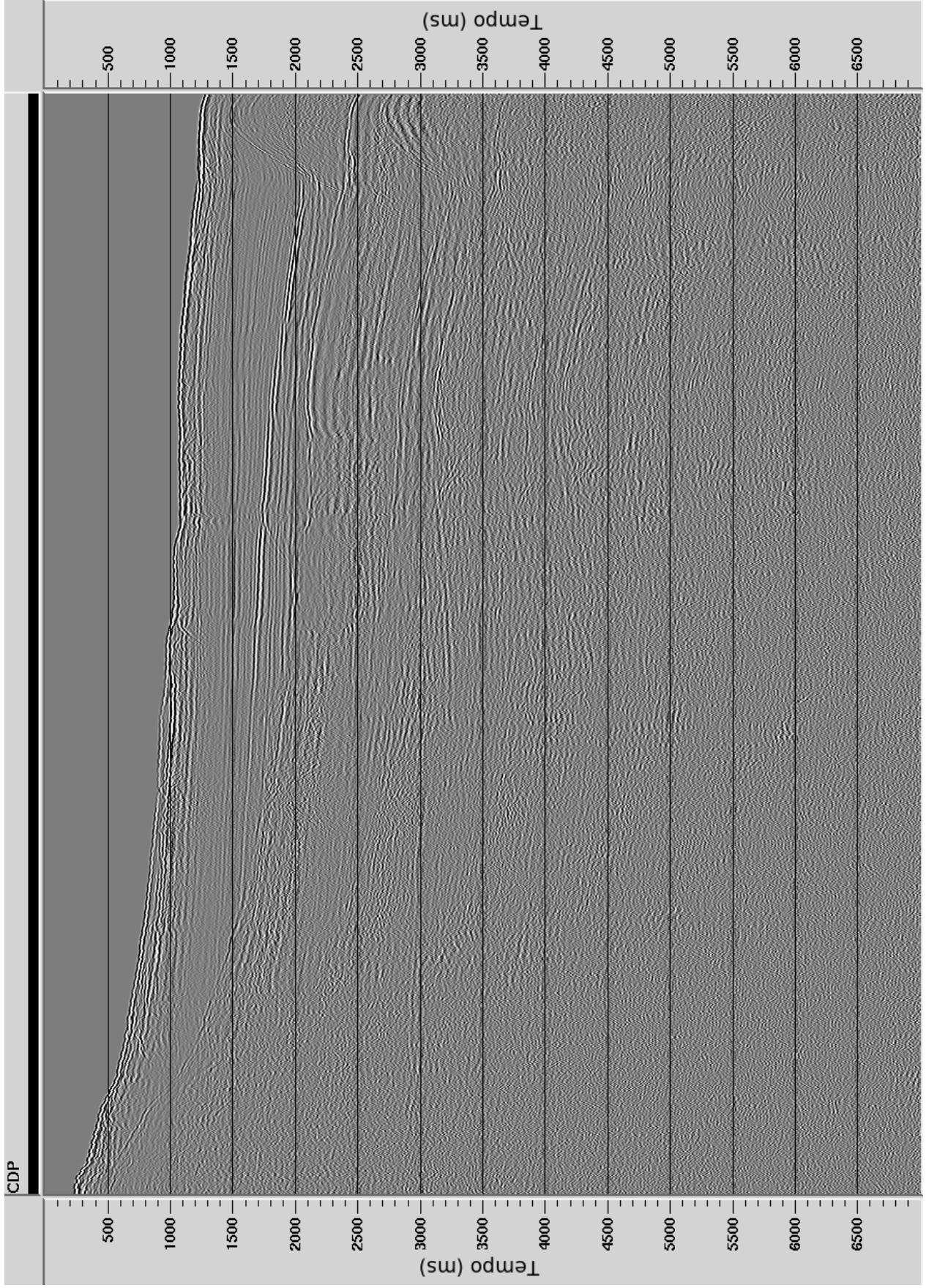


Figura 5.8: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 com o SRME seguido do Radon organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m, linha 97.

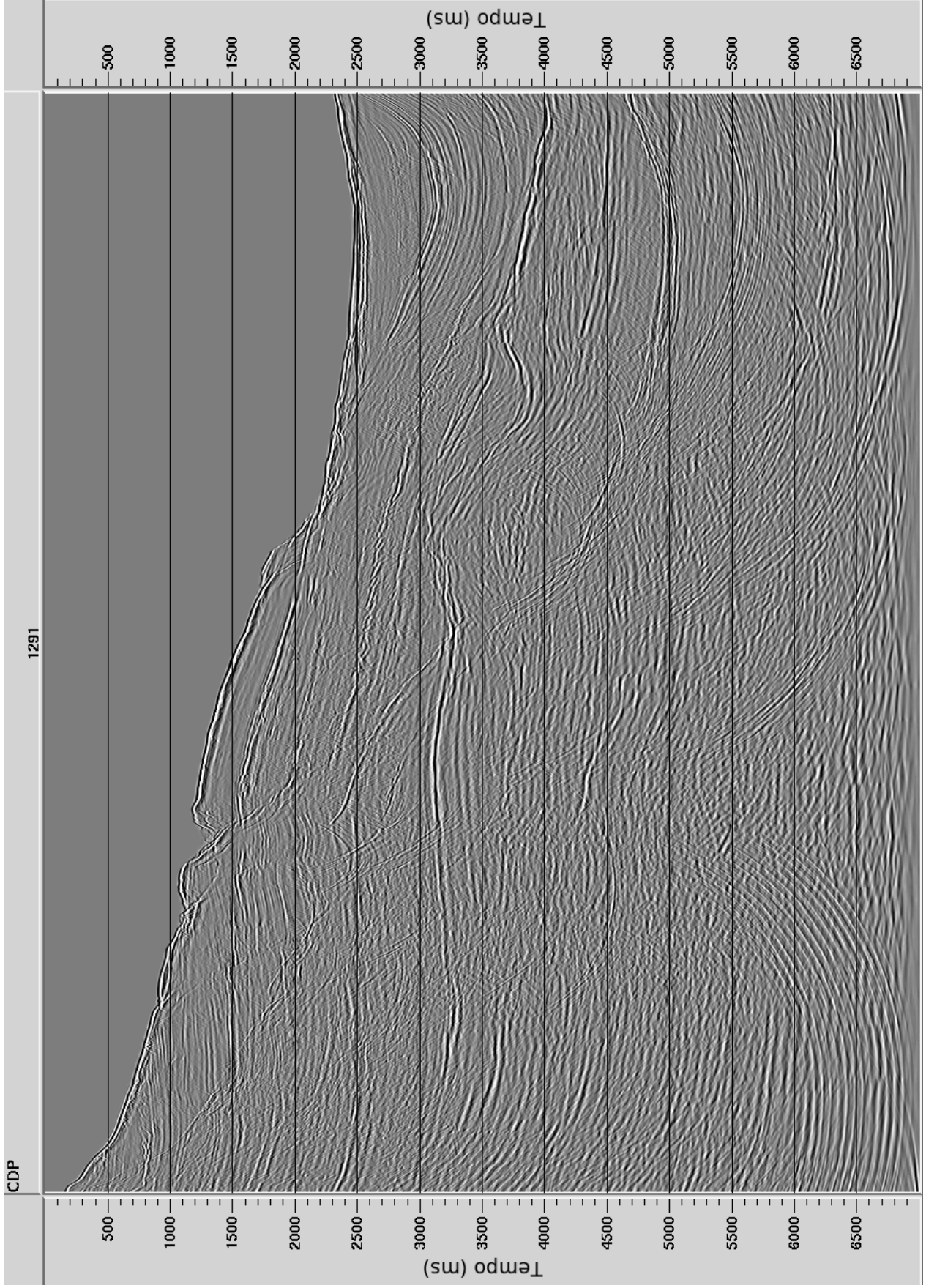


Figura 5.9: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada no estado bruto, linha 66.

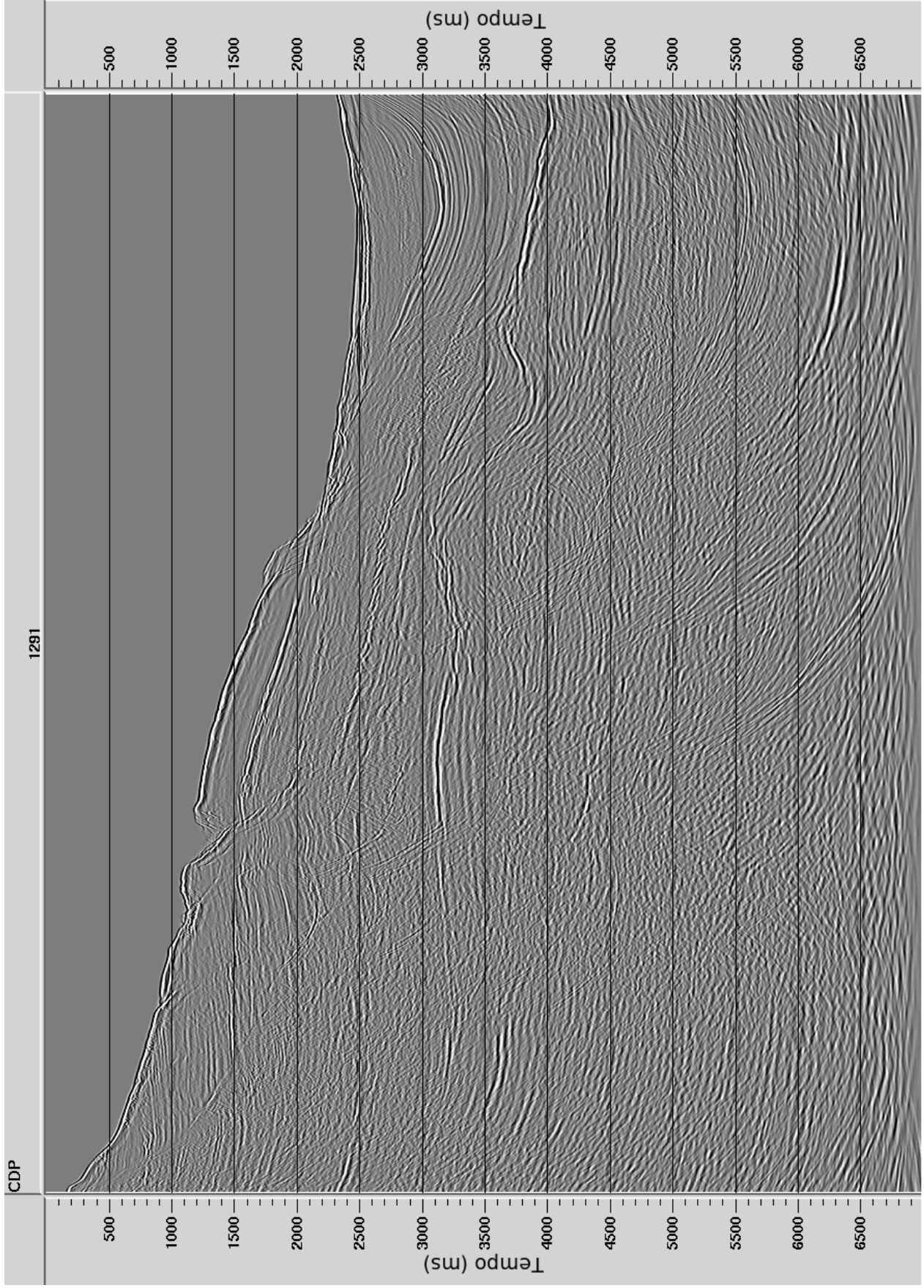


Figura 5.10: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada apenas com o SRME, linha 66.

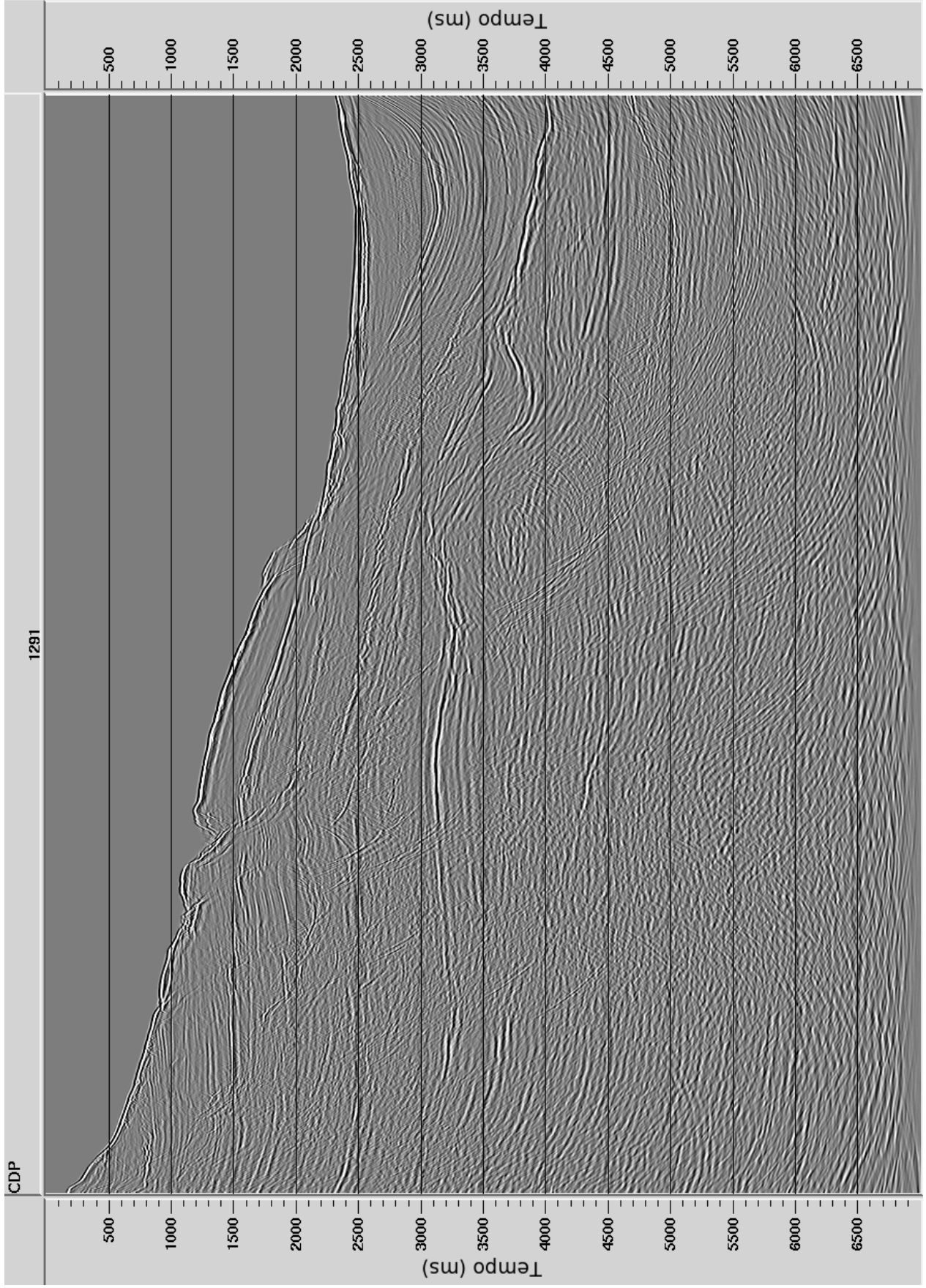


Figura 5.11: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada apenas com o Radon, linha 66.

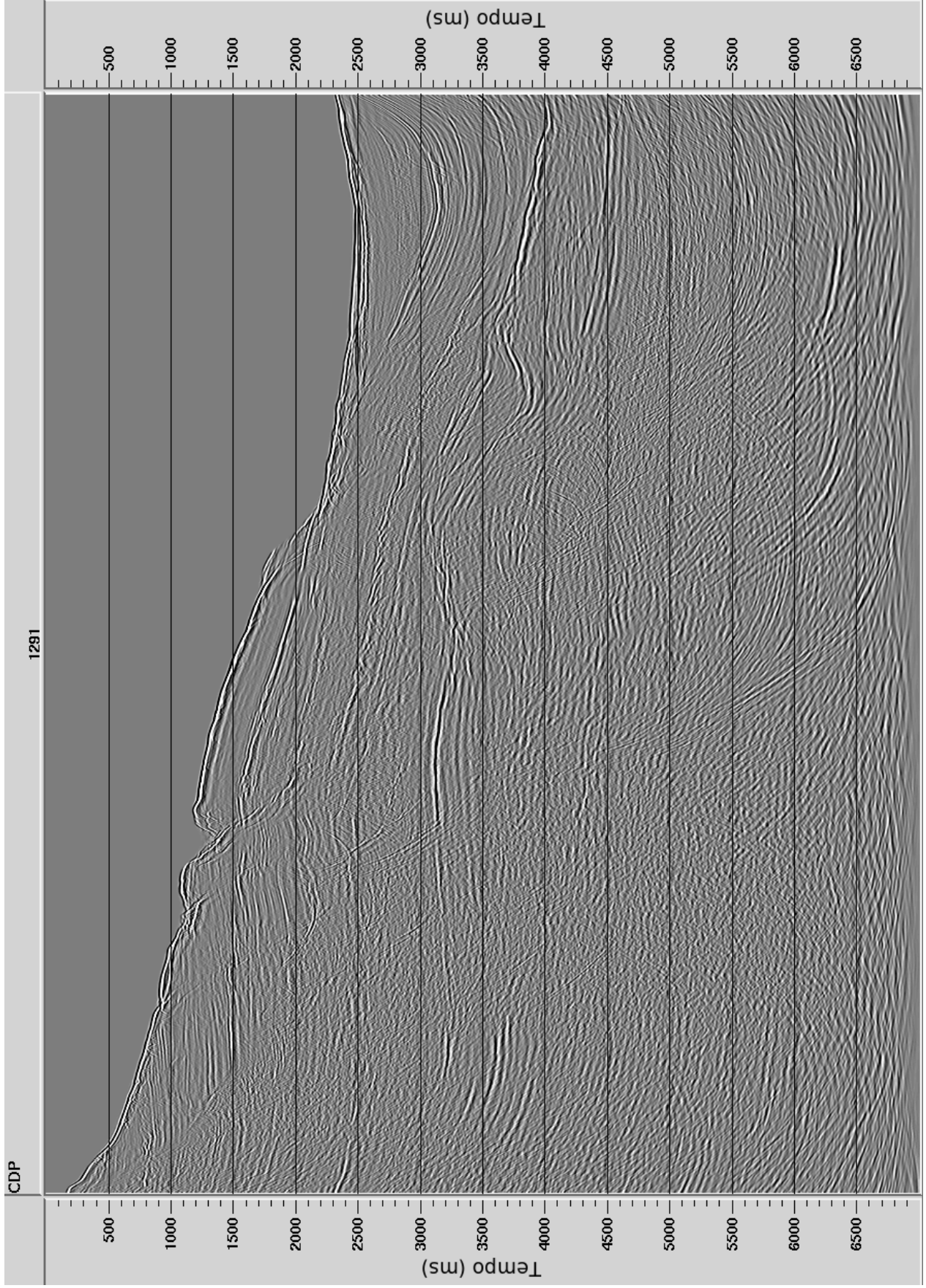


Figura 5.12: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 migrada com o SRME seguido do Radon, linha 66.

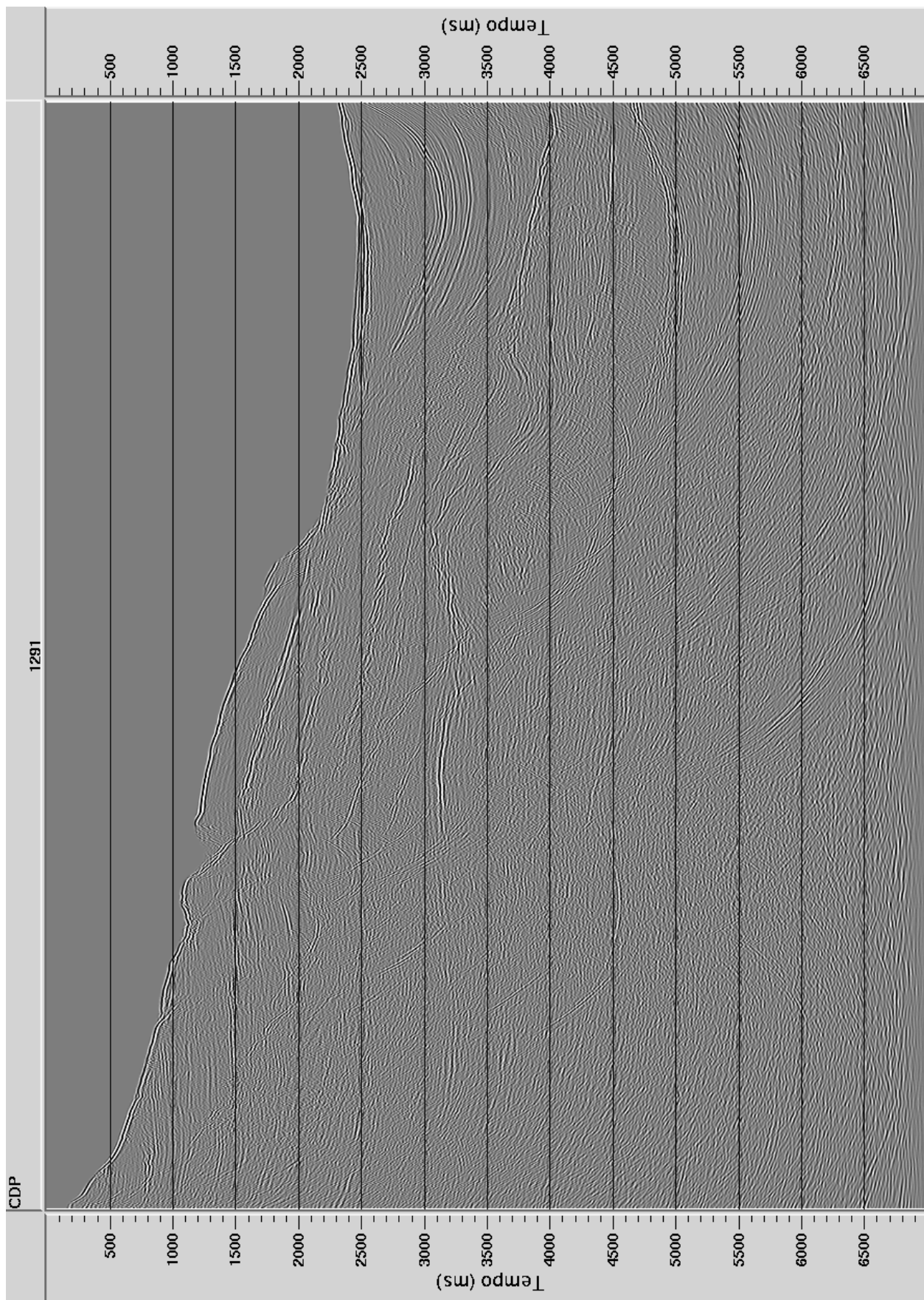


Figura 5.13: Seção mostrando o resultado da migração a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1291 a 3270 apenas com o fluxo convencional, linha 66.

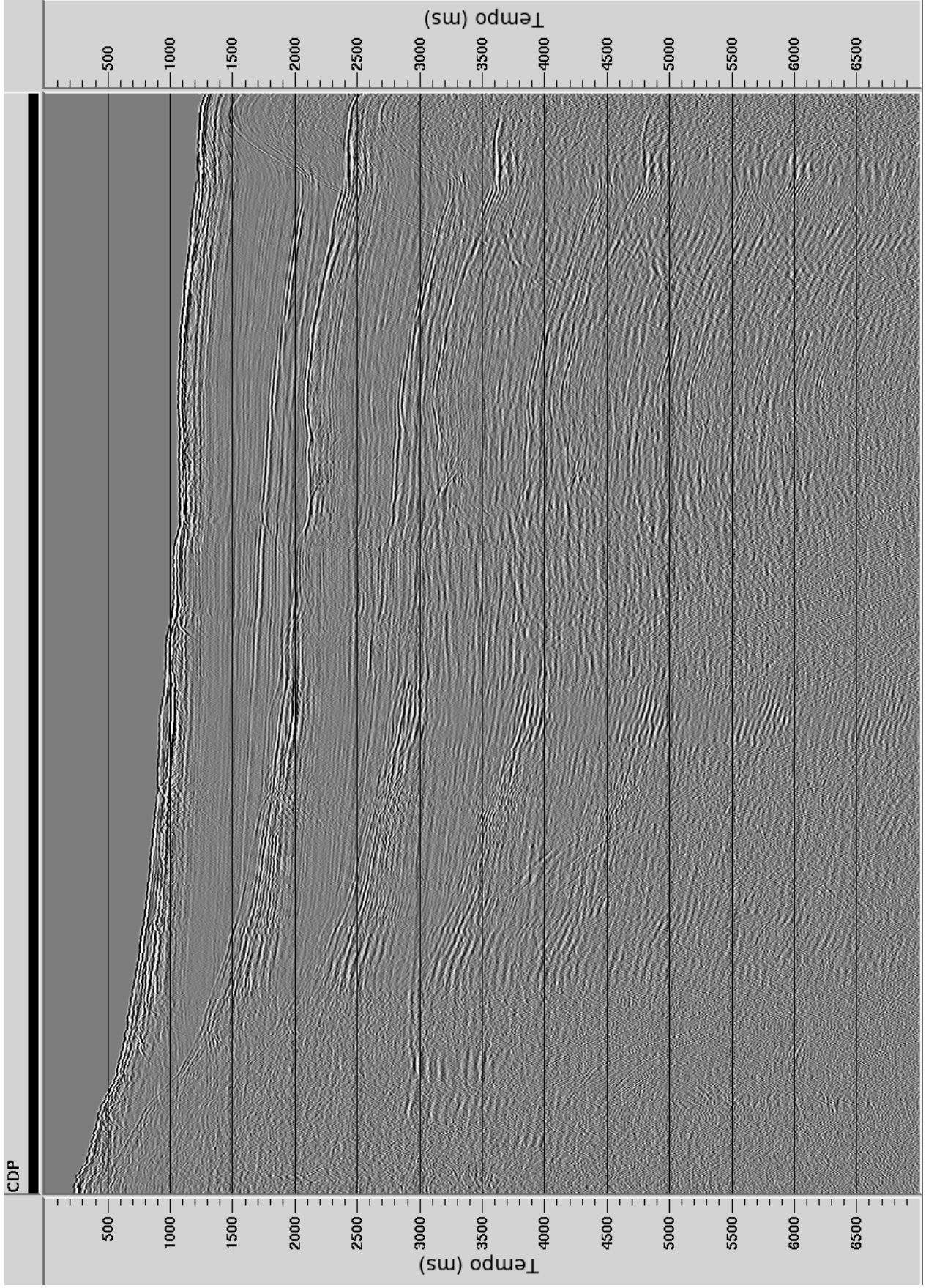


Figura 5.14: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 migrada no estado bruto, linha 97.

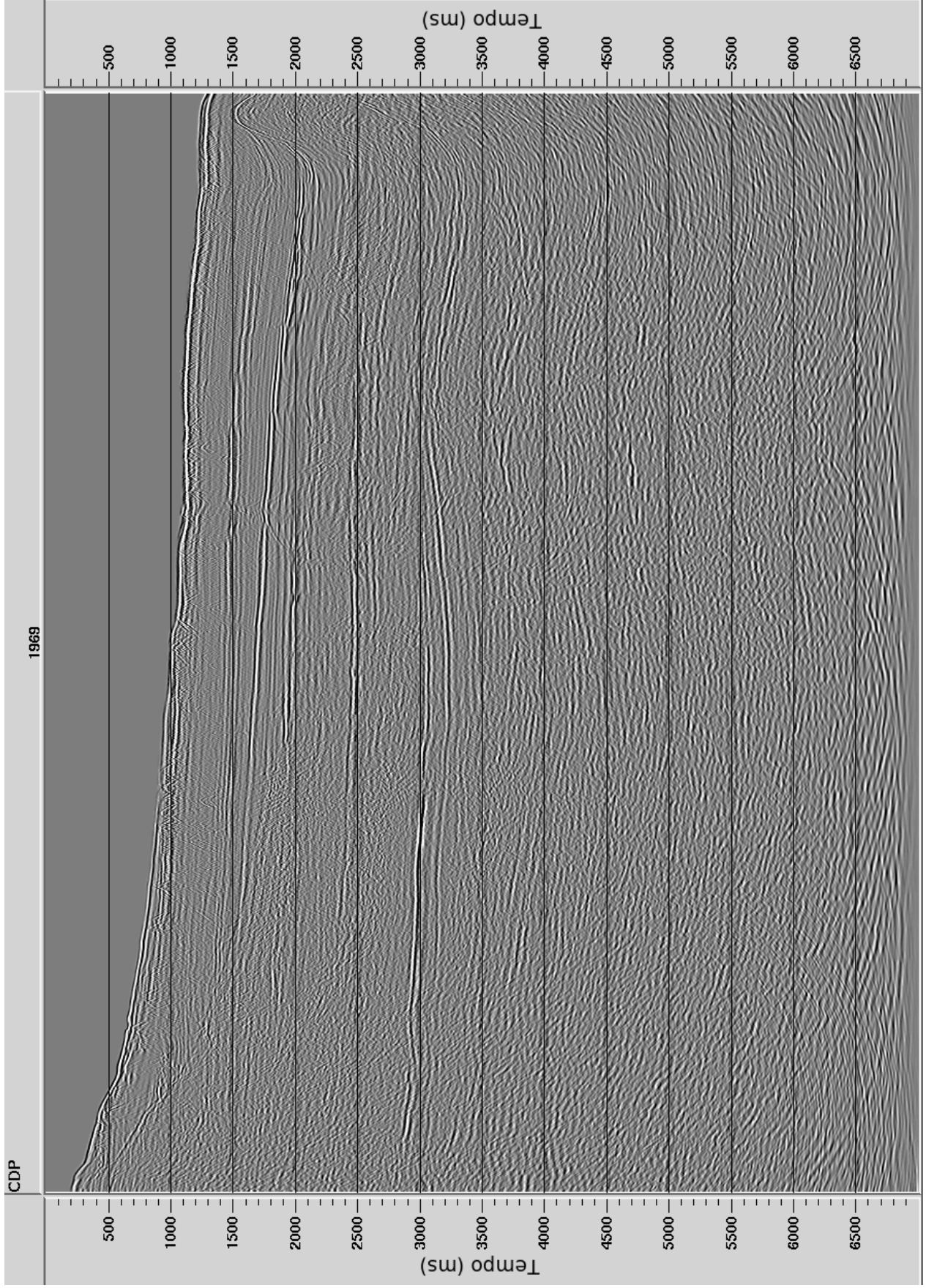


Figura 5.15: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 1270 migrada apenas com o SRME, linha 97.

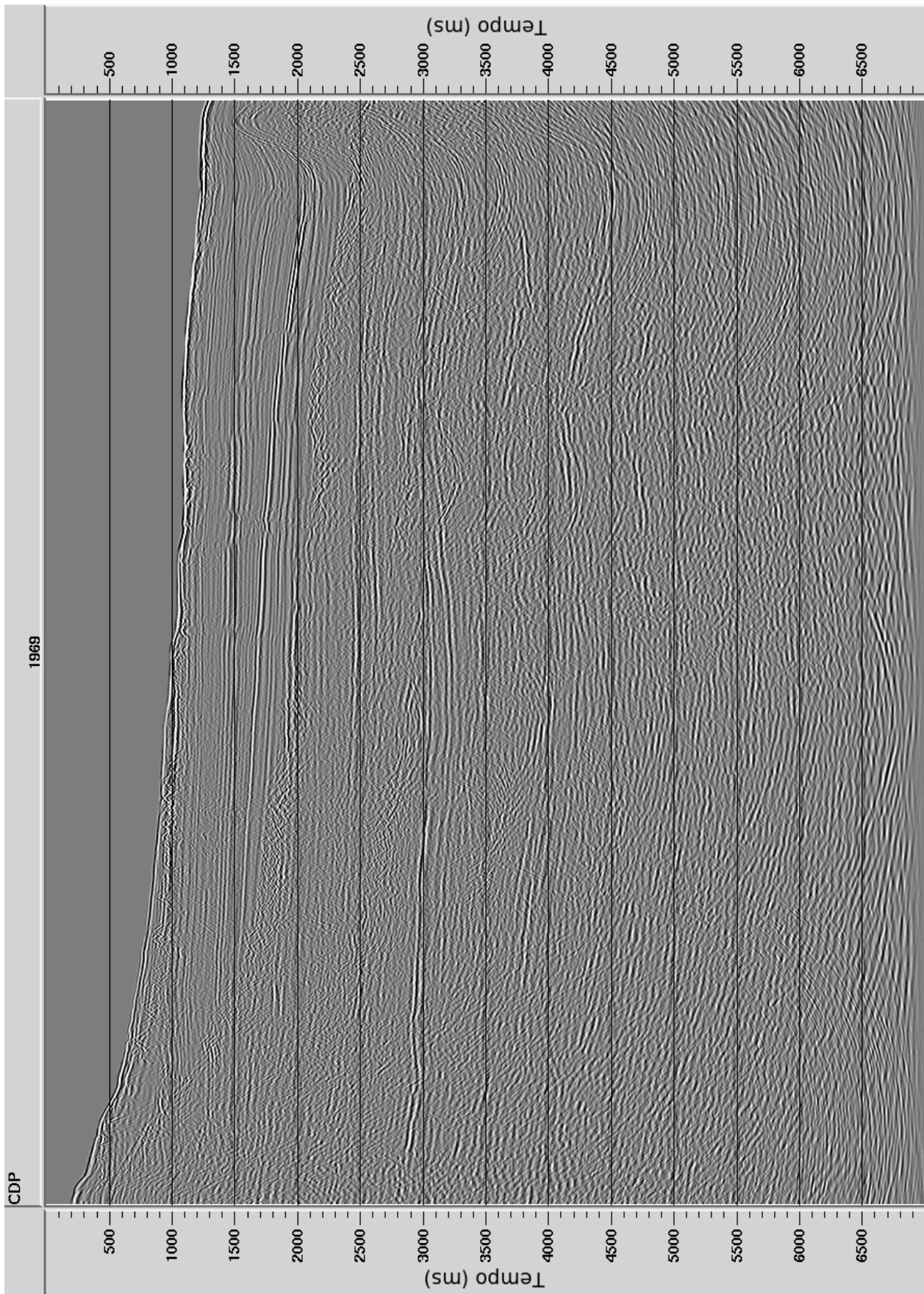


Figura 5.16: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 1200 migrada apenas com o Radon, linha 97.

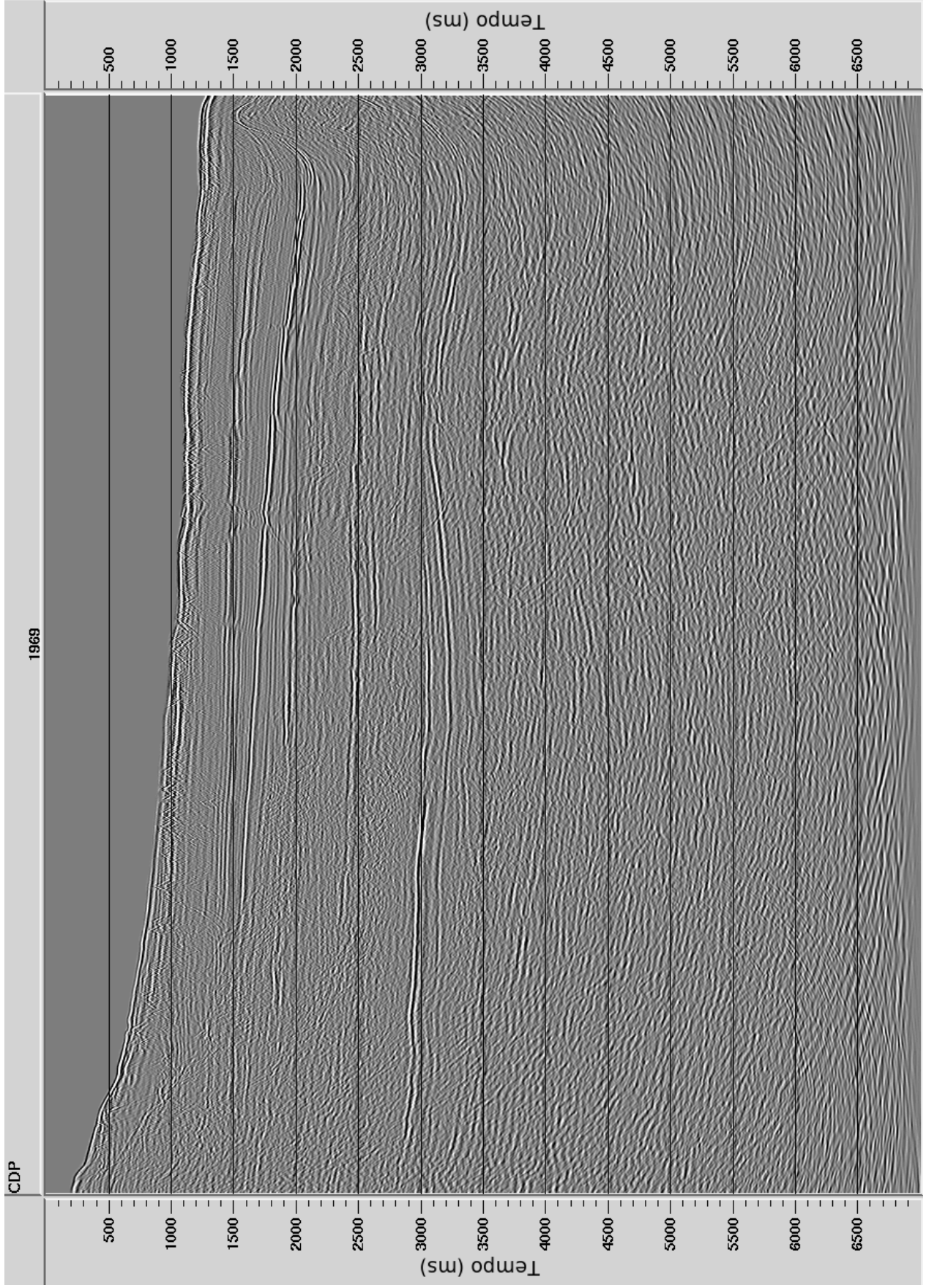


Figura 5.17: Visualização da seção a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 migrada com o SRME seguido do Radon, linha 97.

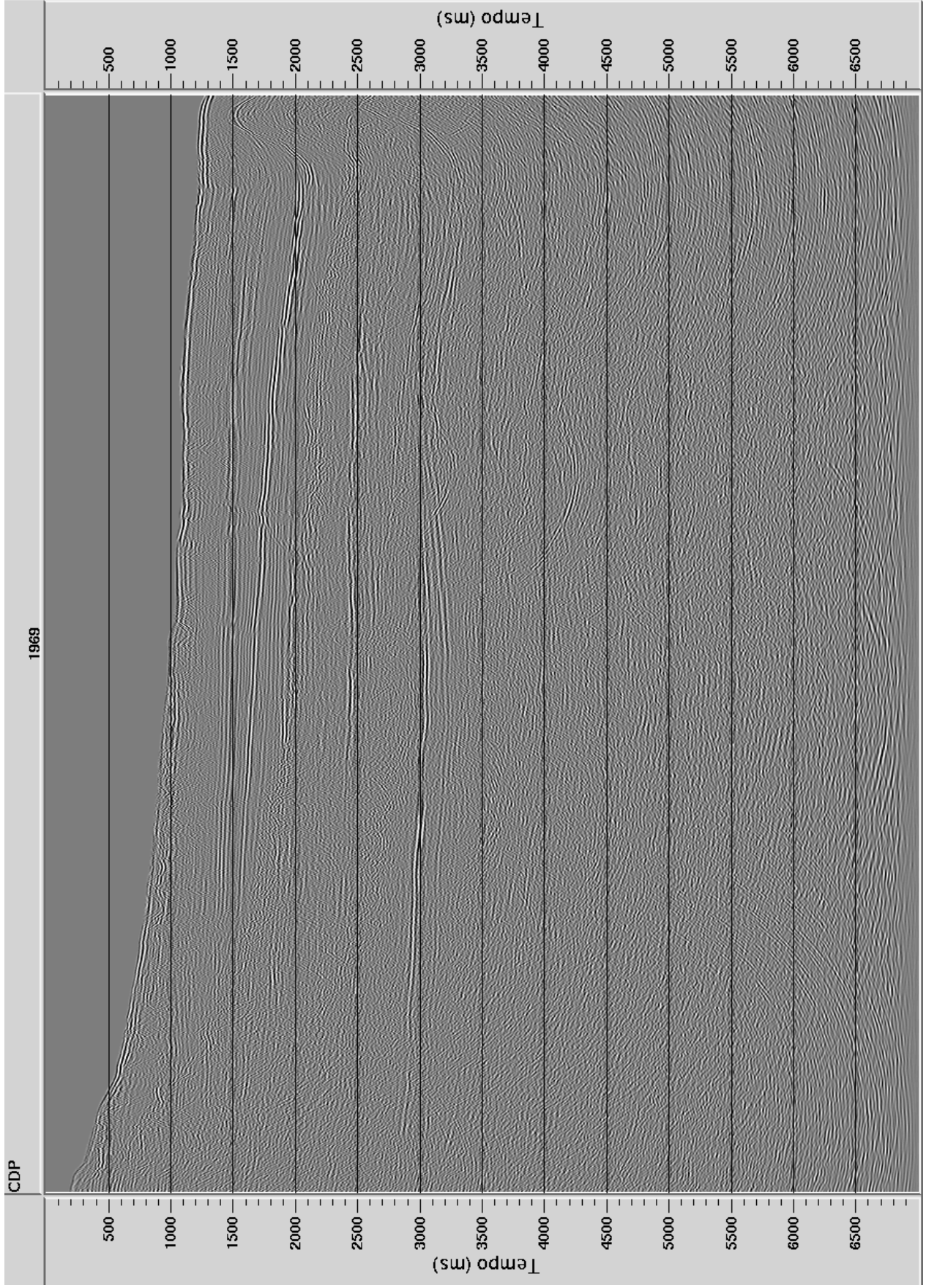


Figura 5.18: Seção mostrando o resultado da migração a partir da quebra do talude para a parte mais profunda da bacia entre os CDP's 1969 a 120 apenas com o fluxo convencional, linha 97.

REFERÊNCIAS

- BERKHOUT, A. J. *Seismic migration: imaging of acoustic energy by wavefield extrapolation. A. Theoretical aspects*. 2 ed. [s.l.] Elsevier Science Publ. Co., Inc., p. 211-218. 1982.
- CÓRDOBA, V. C. *Microfácies, modelo deposicional e evolução da plataforma carbonática albo-cenomaniense da Bacia de Jequitinhonha*. 1990. 127 f. Dissertação Mestrado em Geociências, Universidade Federal de Ouro Preto: UFOP. 1990.
- DUARTE, O. O. *Dicionário enciclopédico de geologia e geofísica*. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Geofísica. 2003.
- FERREIRA, P. P. *Características da Atenuação de Reflexões Múltiplas das Superfície Livre Utilizando a Extrapolação do Campo de Onda*. 2009. 161 f. Dissertação Mestrado em Eng. Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- GAMBOA, F. *Aplicação do método de superfície comum de reflexão (CRS) ao processamento sísmico*. 2007. 213 f. Tese Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2007.
- GAMBOA, F. *Caracterização e eliminação de múltiplas pelo método da superfície comum de reflexão (CRS)*. 2003. 117 f. Dissertação Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.
- IKELLE, L. T.; AMUNDSEN, L. *Introduction to petroleum seismology*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- KENNETT, B. L. N. *The suppression of surface multiples on seismic records*. Geophysical Prospecting, v. 27, p. 584–600. 1979.
- KJARTANSSON, E.; ROCCA, F. *The exploding reflector model and laterally variable media*. Stanford Exploration Project Report. Stanford University, v. 16. 1979.
- LOEWENTHAL, D. L. L. R. R.; SHERWOOD, J. *The wave equation applied to migration*. Geophys. Prosp., v. 24, p. 380–399. 1976.
- MENDONÇA, R. N. A. *Atenuação de reflexões múltiplas em dados sísmicos reais utilizando a técnica de remocção de múltiplas relacionadas á superfície livre –SRME*. 2009. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará: UFPA. 2009.
- RANGEL, H. D.; OLIVEIRA, J. L. F.; CAIXETA, J. M. *Bacia de Jequitinhonha*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 475-483, maio/nov. 2007.

SANTOS, C. F.; GONTIJO, R. C.; ARAÚJO, M. B.; FEIJÓ, F. J. *Bacias de Cumuruxatiba e Jequitinhonha*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n.1, p. 185 -190, jan./mar. 1994.

SCHNEIDER, W. A. *Integral formulation for migration in two-dimensions and three-dimensions*. Geophysics, v. 43, no. 1, p. 49–76. 1978.

TELFORD, W. M. Geldort, L. P. e Sheriff, R. E. *Applied geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, p.770. 1990.

VERSCHUUR, D. J. *Seismic multiple removal techniques: past, present and future*. [S.l.]: EAGE publications. 2006.

VERSCHUUR, D. J.; KABIR, M. M. N. *Comparison of surface-related multiple elimination with Radon multiple elimination*. Journal of Seismic Exploration, v. 1, p. 363–377. 1992.

VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. *Adaptive surface-related multiple elimination*. [S.l.]: Journal Geophysics, v. 57, n. 09, p. 1166-1177, sep. 1992.

VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. *Surface-related multiple elimination in presence of near-surface anomalies*. In: SEG Meeting, 60 th, 1990, San Francisco. *Expanded abstracts*, San Francisco, 1990. p. 1622–1625.

YILMAZ, O. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, seismic data analysis*, v. 1, no. 02 p. 2027. Society of Exploration Geophysicists. 2001.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis, in cooper, m. r. ard doherty, s. m., seismic data analysis*, v. 1, no. 01 [S.l.]: Soc. of expl. geophys., p. 1000. Society of Exploration Geophysicists. 2000.

YILMAZ, O. *Seismic data processing*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists. 1987.