



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROCESSAMENTO E IMAGEAMENTO NMO/CRS DE
DADOS SÍSMICOS MARINHOS

FERNANDO SALES MARTINS NUNES



BELÉM
2010

FERNANDO SALES MARTINS NUNES

**PROCESSAMENTO E IMAGEAMENTO NMO/CRS DE
DADOS SÍSMICOS MARINHOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Sísmicos

Orientador: Prof. Dr. Lourenildo Williane
Barbosa Leite

BELÉM
2010

AGRADECIMENTOS

Registro o meu agradecimento a tudo e todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho, dentre os quais destaco:

- Professor Dr. Lourenildo Leite pela sugestão do tema deste trabalho e pela orientação do mesmo.
- Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa pelo tempo disponibilizado para a leitura e pelas sugestões feitas objetivando a melhora deste trabalho.
- Prof^a. Dr^a Ellen de Nazaré Souza Gomes pelo tempo disponibilizado para a leitura e pelas sugestões feitas objetivando a melhora deste trabalho, além da assistência dada durante na aplicação das técnicas SRME e Radon.
- Prof. Dr. Bjorn Zeno Heilmann pelo tempo disponibilizado para a leitura deste trabalho.
- À secretária do Curso de Pós-Graduação em Geofísica (UFPA) Benildes Lopes, sempre eficiente e disponível a oferecer a ajuda necessária.
- A Agência Nacional do Petróleo-ANP pelo convênio MCT/ANP/UFPA/PRH-06 que proporcionou a bolsa de estudo concedida durante o período do Curso e pelas ajudas necessárias para minha participação em eventos de cunho científico.
- A empresa Petrobrás e aos órgãos FINEP e CNPq pelo financiamento de projetos, equipamentos e estrutura física utilizada durante o período de estudo e trabalho.
- Aos colegas trabalho Rodrigo Santos, Wildney Vieira e Hamilton Lima pelas ajudas e/ou convivência durante o período de Curso.
- Meus pais José Fernando e Maria do Socorro pela compreensão e pelo apoio sempre presente.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

PROCESSAMENTO E IMAGEAMENTO NMO/CRS DE DADOS SÍSMICOS
MARINHOS

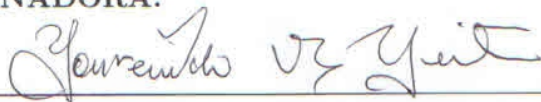
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

FERNANDO SALES MARTINS NUNES

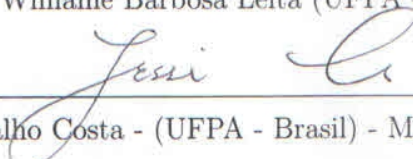
COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Lourenildo Willame Barbosa Leita (UFPA - Brasil) - Orientador



Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa - (UFPA - Brasil) - Membro



Dr. Björn Zeno Heilmann (CRS4 - Itália) - Membro

BELEM
2010

RESUMO

Este trabalho é voltado ao processamento e imageamento de dados de reflexão sísmica marinha selecionados da Bacia do Jequitinhonha, Bahia, onde foram utilizadas duas metodologias de empilhamento, o NMO e o CRS, tendo sido também aplicado o CRS-parcial para densificação de CMPs. Vários testes foram efetuados visando a otimização de parâmetros e para as aberturas dos operadores, visando melhorar as estratégias de processamento. Um dos esforços durante o processamento foi voltado à atenuação da múltipla de superfície livre pela aplicação das técnicas SRME e Radon. Foi também aplicada densificação do dado para melhorar a razão sinal/ruído. Como uma conclusão, uma estratégia de processamento foi escolhida com base nos resultados comparativos de melhor qualidade visual e valores altos de coerência, tendo o empilhamento CRS apresentado qualidade superior aos do empilhamento NMO, com base na visualização de eventos de reflexão que não foram notados em outras seções.

Palavras-Chave: Processamento sísmico. Imageamento sísmico. Empilhamento NMO. Empilhamento CRS.

ABSTRACT

This work is devoted to processing and imaging of marine seismic reflection data selected from the Jequitinhonha Basin, Bahia, where two stack methods were used, the NMO-based and the CRS-based. It was also applied the CRS-partial prestack data enhancement for the densification of CMPs. Several tests were performed with these methods to optimize parameters of the stacking operators, and to improve the processing strategies. One of the efforts during processing was the attenuation of the surface-related multiple, what was attacked by applying the Radon and SRME techniques. It was also applied the densification of the data to improve the signal/noise ratio. As a conclusion, a strategy was chosen based on the comparative results of better visual and higher coherence values, having the CRS method presented superior results to the results with the NMO method, based on the visualization of reflection events that were not noticed in other sections.

keywords: Seismic processing. Seismic imaging. NMO stack. CRS stack.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE ABREVIATURAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	18
2 BACIA DO JEQUITINHONHA	20
3 FUNDAMENTOS DO MÉTODO SÍSMICO	23
3.1 AQUISIÇÃO SÍSMICA	23
3.2 MEIO E O MODELO DIRETO	25
3.2.1 Camadas Plano-Horizontais	25
3.2.2 Camadas Plano-Inclinadas	28
3.2.3 Camadas Curvas	28
4 PROCESSAMENTO CONVENCIONAL	31
4.1 PRIMEIRA ETAPA: PRÉ-PROCESSAMENTO	31
4.1.1 Geometria e Edição de Traços	31
4.1.2 Filtragem	34
4.1.3 Atenuação de Múltiplas	36
4.1.4 Correção de Amplitude	46
4.1.5 Deconvolução Preditiva e ao Impulso	47
4.2 SEGUNDA ETAPA: PROCESSAMENTO	51
4.2.1 Análise de Velocidade e Empilhamento	52
4.2.2 Princípio da Migração da Onda	58
5 PROCESSAMENTO NÃO-CONVENCIONAL	66

5.1	EMPILHAMENTO CRS	66
5.1.1	Atributos da Frente de Onda	66
5.1.2	Superfície de Empilhamento CRS	68
5.2	O EMPILHAMENTO CRS-PARCIAL	68
5.3	FLUXOGRAMA E RESULTADOS	71
6	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – Busca Paramétrica do Operador CRS	87
A.1	Parâmetro $q_{ini}(\beta_0, \mathbf{R}_{NIP}; \mathbf{v}_0)$	87
A.2	Parâmetros β_0 e \mathbf{R}_N	88
	APÊNDICE B – crsstack_511	89
	APÊNDICE C – crsstack_supergathers	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa de localização da Bacia do Jequitinhonha, no Estado da Bahia. Fonte: ANP (2010).	21
Figura 2.2 Coluna estratigráfica da Bacia do Jequitinhonha com a indicação das principais fases tectônicas. Fonte: ANP (2010).	22
Figura 3.1 Geometria de aquisição com configuração de arrasre-de-cabo.	23
Figura 3.2 Modelo esquemático de um levantamento sísmico com três embarcações.	24
Figura 3.3 Configuração CMP. Ponto multi-iluminado em profundidade (acima). Abaixo se tem uma estimativa de como ocorre a iluminação de um seguimento por espalhamento, quando a interface refletora apresenta inclinação.	24
Figura 3.4 Modelo (2D) composto por N camadas com interfaces plano-horizontais e N interfaces refletoras, caracterizadas pela velocidade v_i , densidade ρ_i , espessura z_i e um tempo duplo $\Delta t_i = 2z_i/v_i$. A fonte S e o receptor G estão separados de uma distância x , e x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor.	27
Figura 3.5 Modelo (2D) composto por camadas com interfaces refletoras plano-inclinadas. Cada camada é caracterizada por uma velocidade v_i e uma densidade ρ_i . A fonte S e o receptor G estão separados de uma distância x ; x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor; x_0 é o ponto de partida e emergência da onda normal; e α e β são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo da interface.	29
Figura 3.6 Modelo (2D) de camadas com interfaces curvas caracterizadas por uma velocidade v_i e uma densidade ρ_i . A fonte S e o receptor G estão posicionados na superfície separados de uma distância x . A coordenada x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor, x_0 é o ponto de emergência da onda e α e β são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo do refletor.	30
Figura 4.1 Fluxograma de pré-processamento da linha L2140270.	32
Figura 4.2 Seção FC, número 1500, antes e após o controle de qualidade, onde se verifica o silenciamento do topo da seção e o silenciamento de traços ruidosos. Observa-se a presença de eventos de reflexão com forma hiperbólica, distinta dos eventos de onda direta e de	

refração.	32
Figura 4.3 Seção afastamento-mínimo após a inserção da geometria.	33
Figura 4.4 Conteúdo espectral das 100 primeiras famílias FC antes (à esquerda) e após (à direita) o processo de filtragem f com um banda-passante trapezoidal de cantos $10 - 20 - 45 - 55Hz$. Não foi aplicado ganho a estas imagens.	35
Figura 4.5 Espectro $f - k$ da seção FC, número 500, antes e após a aplicação do filtro $f - k$, banda-passante trapezoidal, com inclinações $(-0.0005, -0.00004, 0.00004, 0.0005s/m)$. Não foi aplicado ganho a estas imagens.	35
Figura 4.6 Seção FC, número 300, antes e após os processos de filtragem f e $f - k$, onde o dado foi limitado a uma banda de frequência e de velocidade, resultando numa seção com eventos de reflexão mais destacados e com eventos de onda direta e refração crítica mais atenuados.	36
Figura 4.7 Organização das famílias FC monocromáticas. Sendo x_s a posição das fontes e x_d o afastamento. Adaptado de Verschuur 1982.	37
Figura 4.8 Ilustração do processo adaptativo de eliminação de múltiplas. Adaptado de Verschuur 1982.	39
Figura 4.9 A imagem da esquerda mostra uma família CMP corrigida NMO. A imagem da direita mostra as múltiplas estimadas contidas na seção. E por fim a imagem contral mostra o resultado da subtração entre o dado original e as múltiplas estimadas.	43
Figura 4.10 Seção afastamento-mínimo antes dos processos de SRME e Radon.	44
Figura 4.11 Seção afastamento-mínimo após os processos de SRME e Radon.	45
Figura 4.12 Família CMP número 2000 antes e após a correção de amplitude.	47
Figura 4.13 Ilustração do processo de filtragem ótima onde $s(t)$ representa a entrada, $h(t)$ o filtro, $y(t)$ a saída real e $d(t)$ a saída desejada.	48
Figura 4.14 Função auto-correlação da família CMP número 2000 antes e após a deconvolução ao impulso.	50
Figura 4.15 Família CMP número 2000 antes e após a deconvolução ao impulso visualizadas na janela temporal de 1 a 6s.	51
Figura 4.16 Fluxograma da segunda etapa do processamento da linha L2140270. Como principais resultados desta etapa temos o dado empilhado e migrado.	51

Figura 4.17 Família CMP. (a) Evento de uma reflexão primária com forma hiperbólica representada pela eq. (3.9). (b) Resultado da correção NMO onde a horizontalização do evento indica que a v_{NMO} escolhida foi correta. (c) Resultado da correção NMO indicando que a v_{NMO} escolhida foi baixa. (d) Resultado da correção NMO indicando que a v_{NMO} escolhida foi alta.	52
Figura 4.18 Modelo de velocidade suavizado obtido no PROMAX. A cor azul está relacionada às camadas com velocidades mais baixas (neste caso da camada d'água) e a cor vermelha às mais altas (neste caso das camadas sólidas mais profundas).	54
Figura 4.19 Mapa semblance e sua correspondente família CMP, respectivamente.	56
Figura 4.20 Família CMP após a correção NMO mostrando a horizontalização dos eventos de reflexão e o estiramento dos traços (1ª imagem). Efeito do estiramento parcialmente solucionado pelo corte cirúrgico (2ª imagem). Traço resultante do processo de empilhamento (3ª imagem).	56
Figura 4.21 Seção empilhada NMO.	57
Figura 4.22 Meio escalar (3D) com volume V_0 delimitado pela fronteira $S_0 = A_0 + A'$, com um ponto fonte em \vec{r}_0 , sua imagem em \vec{r}'_0 e um ponto de observação em \vec{r}	58
Figura 4.23 Esquematisação de como a função transferência H promove a translação do campo de um plano z para outro.	60
Figura 4.24 Representação do modelo (2D) <i>refletor em explosão</i> . As fontes estão localizadas nas interfaces refletoras, e são acionadas simultaneamente. O campo produzido se propaga de acordo com o Princípio de Huygens até a superfície de aquisição $z = 0$	61
Figura 4.25 A esquerda o modelo afastamento-nulo e a direita o modelo refletor explosivo. Na primeira imagem o campo de onda parte a superfície no instante $t = 0$, reflete em D e retorna a superfície onde é registrada no tempo t . Na segunda imagem se tem outra forma de representar o afastamento-nulo, onde o campo de onda parte um ponto da subsuperfície no tempo $t = 0$ e é registrado na superfície no tempo $2t$. Outra forma de relacionar estes modelos é que a velocidade do campo de onda no segundo modelo é a metade da velocidade no primeiro.	61
Figura 4.26 Relação entre o dado de entrada $u(x, y, z = 0, t)$ e o de saída $u(x, y, z, t = 0)$ no mapeamento do campo de onda em (x, y, z, t) para $(x, y, z, \frac{z}{c})$	63
Figura 4.27 Seção migrada Kirchhoff.	64

Figura 4.28 Seção migrada Stolt.	65
Figura 5.1 Modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano-horizotal com desenho dos atributos da frente de onda. β_0 é o ângulo de emergência da onda hipotética de raio central referente ao experimento AN. (a) Onda-NIP com origem num ponto NIP de raio de curvatura R_{NIP} e curvatura K_{NIP} . (b) Onda-N com origem num seguimento do refletor de raio de curvatura R_N e curvatura K_N	67
Figura 5.2 Parte inferior: Modelo composto (3D) por duas camadas sobre um semi-espço. O raio em N tem cor vermelha. Parte superior: Superfície de cobertura múltipla, em azul, correspondente às reflexões da segunda interface. Em vermelho, a superfície de empilhamento CRS correspondente ao ponto de reflexão R calculada através da aproximação hiperbólica 5.5.	69
Figura 5.3 Superfície do operador CRS parcial (em vermelho) ao longo da qual se empilha as amplitudes em torno de um ponto $A(t_A, h_A)$ especificado na curva temporal relacionada a um CMP (curva roxa), e atribuindo o resultado a este mesmo ponto para gerar uma super-família CRS. A curva de empilhamento CRS parcial coincide localmente com a curva de empilhamento CRS (em verde).	69
Figura 5.4 Família CMP número 2900 (esquerda). Super-família CMP número 2900 (direita). Visualização na janela temporal de 2,0–4,0s. Devido à densificação do dado observa-se uma melhora para identificação dos eventos de reflexão. Não foi aplicado ganho a estas imagens.	70
Figura 5.5 Representação gráfica dos testes efetuados durante o empilhamento CRS parcial. A hipérbole testada com desvio mínimo está relacionada à eq. (5.6) e a hipérbole que melhor se ajusta ao evento $A(t_A, h_A)$ está relacionada à eq. (5.7) com tempo-duplo dado pela eq. (5.8).	71
Figura 5.6 Seção coerência do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.	75
Figura 5.7 Seção ângulo de emergência β_0 do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.	76
Figura 5.8 Seção raio de curvatura R_N do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.	77
Figura 5.9 Seção raio de curvatura R_{NIP} do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.	78

Figura 5.10 Seção empilhada CRS otimizada.	79
Figura 5.11 Seção CRS-migrada otimizada.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
AC	Afastamento-comum
AN	Afastamento-nulo
CMO	Do inglês “Curve Moveout”
CMP	Ponto-médio-comum
CRS	Superfície de reflexão comum
DMO	Do inglês “Dip-moveout ”. Sobre-tempo de mergulho.
FC	Fonte-comum
N	Onda Normal
NIP	Onda NIP. Ponto de incidência normal
NMO	Sobretempo-normal
NMOC	Do inglês “Normal moveout corrected ”
RC	Receptor-comum
RMS	Média-quadrática
SRME	Do inglês “Surface-related multiple elimination ”

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO LATINO	DESCRIÇÃO
A_0	Área da superfície de aquisição
A'	Área do semi-elipsóide
a_i	Filtro de predição de erro
\mathbf{b}	Vetor de parâmetros
c	Velocidade constante do meio
C_0, C_1, C_2, \dots	Coefficientes da expansão em Taylor
$D(\omega)$	Transformada de Fourier de $d(t)$
$\bar{d}(t)$	Filtro de difração
d_i	Saída desejada
e_i	Parte preditível do dado
f	Frequência linear
$G(r, t)$	Função de Green
h	Meio-afastamento fonte-receptor
h_i	Filtro ótimo
\mathbf{I}	Matriz identidade
K_N	Curvatura da onda-N
K_{NIP}	Curvatura da onda-NIP
\vec{k}	Vetor número-de-onda
$L(h)$	Função desajuste
m	Afastamento x entre o ponto de reflexão real e aparente
N_h	Comprimento de h_i
N_a	Comprimento de a_i
N_s	Comprimento de s_i
\vec{n}	Vetor perpendicular à superfície S_0
$P_0(x_0, t_0)$	Ponto de emergência do raio central
$P(r, t)$	Campo de ondas-P (ondas longitudinais)
\mathbf{P}	Matriz campo de ondas monocromático
p	Parâmetro horizontal do raio
q	Fonte

$\mathbf{R}^-(z_0)$	Matriz refletividade da superfície livre
\bar{R}	Distância entre \vec{r} e \vec{r}_0
R_0	Raio de curvatura no ponto $P_0(x_0, T_0)$
R_i	Raio de curvatura na i -ésima camada
R_i, F	Raio de curvatura da i -ésima interface
R_N	Raio de curvatura da onda-N
R_{NIP}	Raio de curvatura da onda-NIP
\vec{r}	Vetor posição
\vec{r}_0	Vetor posição do ponto da fonte
\mathbf{S}^+	Campo de onda da fonte
S_0	Superfície que envolve o meio
$S(x_0, t_0; v_0)$	Semblance
s_i	Sinal de entrada
\bar{s}_t	Traço empilhado
t	Tempo de afastamento nulo
$t(0)$	Tempo-duplo
$U(k, \omega)$	Transformada de Fourier de $u(r, t)$
$u(r, t)$	Campo de onda escalar
\bar{u}_{i, t_i}	Amplitude do traço
V_0	Volume do meio
v_{CMO}	Velocidade relacionada à onda-N
v_i	Velocidade da i -ésima camada
v_{NMO}	Velocidade de correção NMO
v_{RMS}	Velocidade média-quadrática
v_E	Velocidade de empilhamento
$\mathbf{X}_0(z_0, z_0)$	Matriz resposta ao impulso
x	Afastamento fonte-receptor
x_0	Ponto de emergência do raio central
x_s	Posição da fonte
x_r	Posição do receptor
x_m	Ponto médio
y_i	Saída real
z	Profundidade

SÍMBOLO GREGO	DESCRIÇÃO
α	Ângulo de incidência por cima
β	Ângulo de incidência por baixo
Δ	Variação
∇^2	Laplaciano
∂	Diferencial parcial
ω	Frequência angular
δ	Delta de Dirac
ϕ^{ss}	Autocorrelação de s_i
ϕ^{sd}	Correlação entre s_i e d_i
Σ	Somatória
Π	Produtória

1 INTRODUÇÃO

O objetivo geral deste trabalho é voltado à obtenção de imagens sísmicas da sub-superfície em áreas de bacias sedimentares marinhas potenciais para a exploração de hidrocarbonetos. Para isto foram usados métodos diferentes para a simulação das seções em afastamento-nulo (AN), seguidas de processos de migração. Já o objetivo específico e prático foi o processamento e o imageamento da Linha L2140270 da Bacia do Jequitinhonha, utilizando as metodologias de empilhamento NMO e CRS com a finalidade de analisar qual destas gerou melhores resultados no sentido de aumentar a razão sinal/ruído do dado e, conseqüentemente, a qualidade visual das seções empilhadas e migradas obtidas.

O dado sísmico utilizado foi coletado em 1985 e seu ambiente geológico é posicionado na plataforma continental marinha, cobrindo a zona de quebra do talude até o sopé, e se caracteriza pela variação tectônica das bacias da margem passiva do leste Brasileiro, relacionado à abertura do oceano Atlântico. Sendo assim, a geologia é caracterizada como sendo complexa, o que reflete sobre os dados sísmicos que também se caracterizam pela presença forte de múltiplas da superfície livre e ruído aleatório proveniente do levantamento. Sendo um desafio a obtenção de estratégias que busquem resolver estes problemas e que permitam um melhor imageamento das estruturas, contribuindo para que haja sucesso e otimização de custos na exploração dos recursos energéticos marinhos.

O empilhamento NMO aqui referido é baseado no modelo de camadas planas, sendo o cálculo do tempo de trânsito de reflexões primárias dado por uma aproximação hiperbólica função do afastamento fonte-receptor. Este modelo permite a determinação de uma distribuição de velocidade em função do tempo de afastamento nulo obtido pela marcação de pares (v_{NMO}, t_0) no mapa semblance, a correção de sobre-tempo-normal, o empilhamento, a migração, a zona de Fresnel e o espalhamento geométrico (YILMAZ, 1988).

O empilhamento CRS, descrito por Müller (1999) e Mann (2002), é considerado independente do modelo de velocidade e descrito geometricamente por camadas limitadas por interfaces curvas e contínuas, sendo o cálculo do tempo de trânsito das reflexões primárias dado por uma aproximação hiperbólica. Neste método, a física envolvida se baseia nos atributos de duas ondas hipotética: a onda-N e a onda-NIP. Os atributos são o ângulo de emergência, β_0 , comum a estas duas ondas, o raio de curvatura da onda-N, R_N , e o raio de

curvatura da onda-NIP, R_{NIP} . Estes atributos carregam informações sobre a inclinação, a profundidade e a curvatura das superfícies refletoras. Com o objetivo de melhorar a qualidade dos resultados, se aplicou a densificação das famílias CMPs através do processo de empilhamento CRS-parcial, descrito por Baykulov e Gajewski (2008), e que produziu seções com melhor razão sinal/ruído.

Para o processamento e imageamento foram utilizados os aplicativos livres *CWP/Un*x* (FOREL et al., 2005), *crsstack_511* (MANN, 2003) e *crsstack_supergathers* (BAYKULOV, 2008), e o aplicativo *PROMAX* (versão 2003.19.1, da Landmark Graphics Corporation, empresa da Halliburton Services Ltd., licença acadêmica).

Este trabalho é dividido em cinco capítulos e três apêndices. No Capítulo 2 é feito um resumo das principais características da Bacia do Jequitinhonha, localização e geologia. No Capítulo 3 é feita uma descrição da geometria de aquisição do dado real, e dos modelos admitidos para a subsuperfície. No Capítulo 4 é apresentado um fluxograma para o processamento NMO dividido em duas etapas, e feito a descrição das técnicas empregadas, seguido dos principais resultados. No Capítulo 5 é apresentado um fluxograma para o processamento CRS, seguido dos principais resultados. O Capítulo 6 é dedicado às conclusões e sugestões para a complementação deste trabalho. O Apêndice A descreve a busca automática inicial do trio de parâmetros (β_o , R_N , R_{NIP}) do CRS. E nos Apêndices B e C se encontra uma breve descrição dos parâmetros envolvidos nos algoritmos dos aplicativos *crsstack_511* e *crsstack_supergathers*, respectivamente.

2 BACIA DO JEQUITINHONHA

Neste capítulo é feita uma descrição resumida das principais características geológicas da Bacia do Jequitinhonha seguindo Mohriak, Szatman e Anjos (2008) e Alves (2008). Assim as imagens sísmicas resultantes do processamento buscam nos modelos geológicos respaldo para as interpretações.

A Bacia do Jequitinhonha pertence ao grupo de bacias litorâneas brasileiras, e se localiza na margem leste da costa brasileira no Estado da Bahia entre os paralelos de $14^{\circ}37'$ sul e $16^{\circ}24'$ sul (ver Figura 2.1). A maior parte da bacia é submersa e cerca de 20% de sua área de 25.685km^2 é emersa, tornando-a uma bacia eminentemente marítima. Ao norte, sua batimetria descreve uma plataforma com espessura de lâmina d'água variando progressivamente, e a partir de 50m inicia-se o talude suavemente íngreme e que chega a 3.000m de profundidade. Ao sul, tem-se uma plataforma mais alongada que pode chegar até 85km de extensão, e um talude mais íngreme cuja profundidade varia de 50m a 3.000m . De maneira geral, a bacia apresenta uma forma extensa mergulhante para leste, para onde teria se dado a fuga do sal em direção às águas profundas. A coluna estratigráfica inclui uma sequência de sin-riftes, seguida de uma sequência transicional evaporítica e de uma sequência marítima em suas fases carbonáticas, de uma sequência marinha transgressiva e uma regressiva (ver Figura 2.2).

A bacia apresenta uma sedimentação marítima cretácea e paleogena preponderante quando comparada à sedimentação rifte. Espessas camadas de sal e domos de até 4 km de espessura se desenvolvem nas porções de águas profundas e ultra-profundas formando maciços que se desenvolvem na direção NNW-SSE. A presença de sal nas bacias sedimentares é um importante condicionante da geologia do petróleo, pelas especulações de que suas deformações causam nos sedimentos pós-sal e pela existência de duas fases tectônicas distintas denominadas de pré-sal e pós-sal, sendo este um dos motivos pelos presentes esforços exploratórios na Bacia do Jequitinhonha onde, até o ano de 2006, houve a descoberta de petróleo leve com volume subcomercial.



Figura 2.1: Mapa de localização da Bacia do Jequitinhonha, no Estado da Bahia. Fonte: ANP (2010).

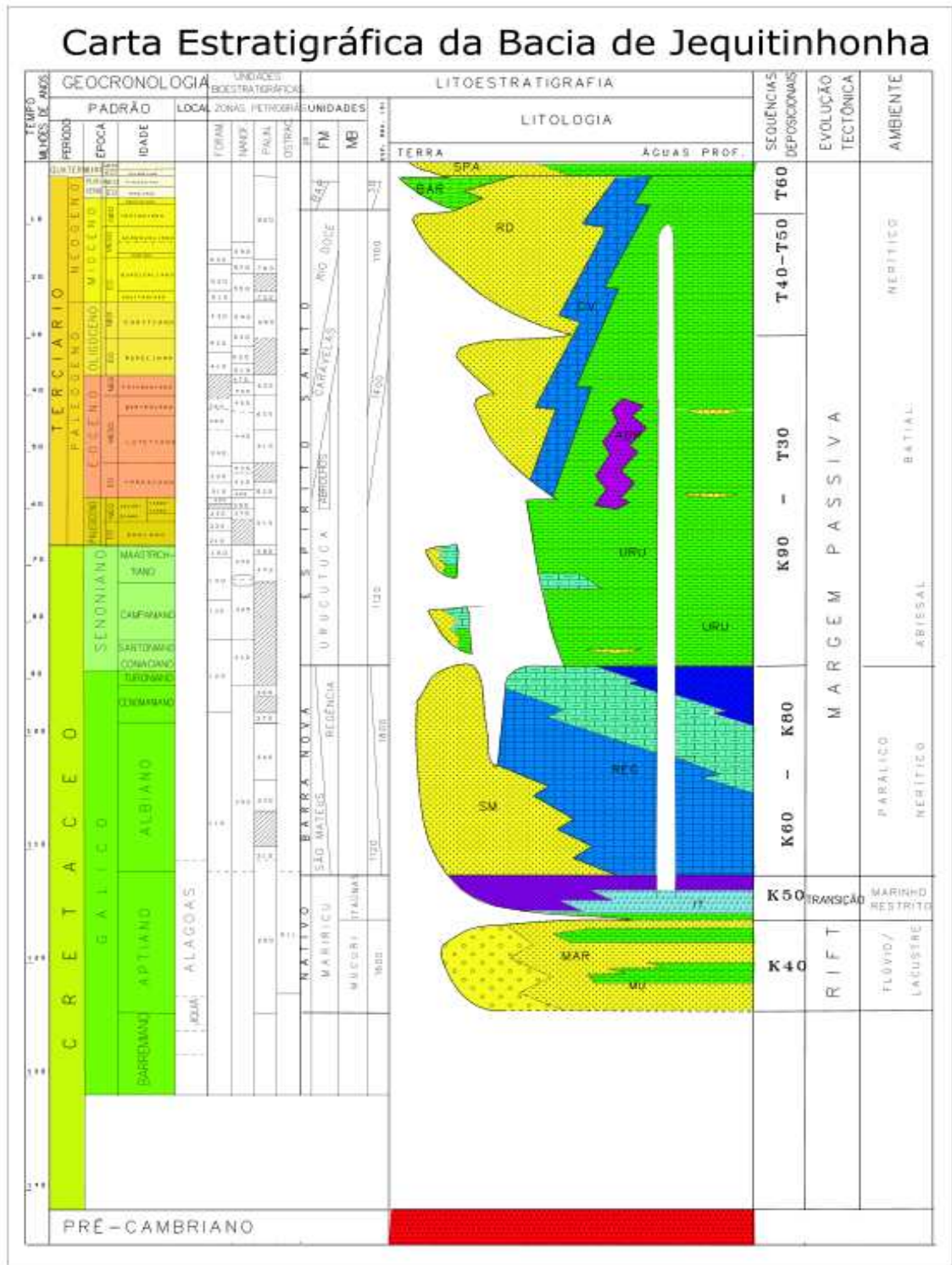


Figura 2.2: Coluna estratigráfica da Bacia do Jequitinhonha com a indicação das principais fases tectônicas. Fonte: ANP (2010).

3 FUNDAMENTOS DO MÉTODO SÍSMICO

3.1 AQUISIÇÃO SÍSMICA

Esta seção tem como objetivo descrever a configuração e a geometria de aquisição utilizada para levantamentos sísmicos na Bacia do Jequitinhonha, para um melhor entendimento das terminologias utilizadas (IKELLE; AMUNDSEN, 2005).

A aquisição sísmica é dividida em duas grandes partes que são a marinha e a terrestre. Nos levantamentos marinhos se faz necessária a descrição da propagação de ondas sísmicas em meios escalares e em meios elásticos, com configuração de arrasto-de-cabo (*towed-stream*), com domínio de aquisição FC. Esta configuração é composta por um arranjo de canhões-de-ar (*air gun*), com cabos contendo receptores (que medem variações de pressão correspondentes às ondas-*P*) e que são puxados por uma embarcação que procura manter velocidade constante. Estes cabos são posicionados horizontalmente cerca de 10m abaixo da superfície da água, podendo chegar até a 10.000m de comprimento, e onde os receptores, assim como os pontos de tiro, são espaçados uniformemente uns dos outros. Nos levantamentos atuais uma embarcação reboca entre 12 e 16 cabos espaçados de 50m a 100m um do outro (ver Figura 3.1), sendo um desafio manter este espaçamento fixo durante toda a aquisição. Em alguns casos duas ou mais embarcões são usadas para a coleta de dados, especificamente para coleta de dados com longos afastamentos e em configuração bilateral-simétrica (*split-spread*) (ver Figura 3.2).

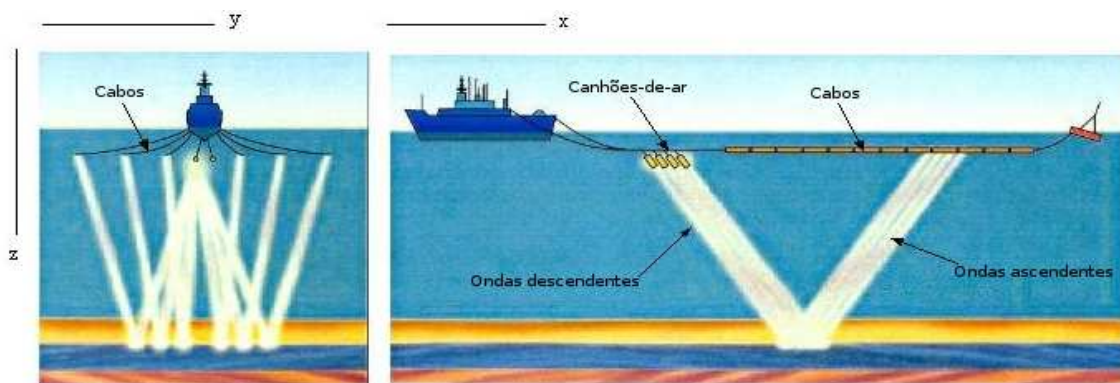


Figura 3.1: Geometria de aquisição com configuração de arraste-de-cabo.

O dado processado neste trabalho foi obtido segundo a configuração de arrasto-de-cabo

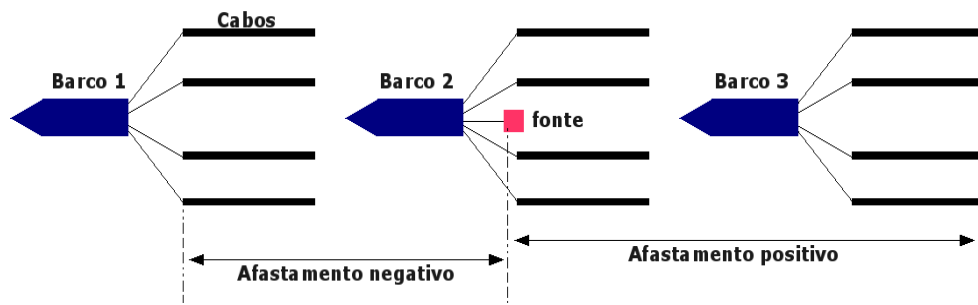


Figura 3.2: Modelo esquemático de um levantamento sísmico com três embarcações.

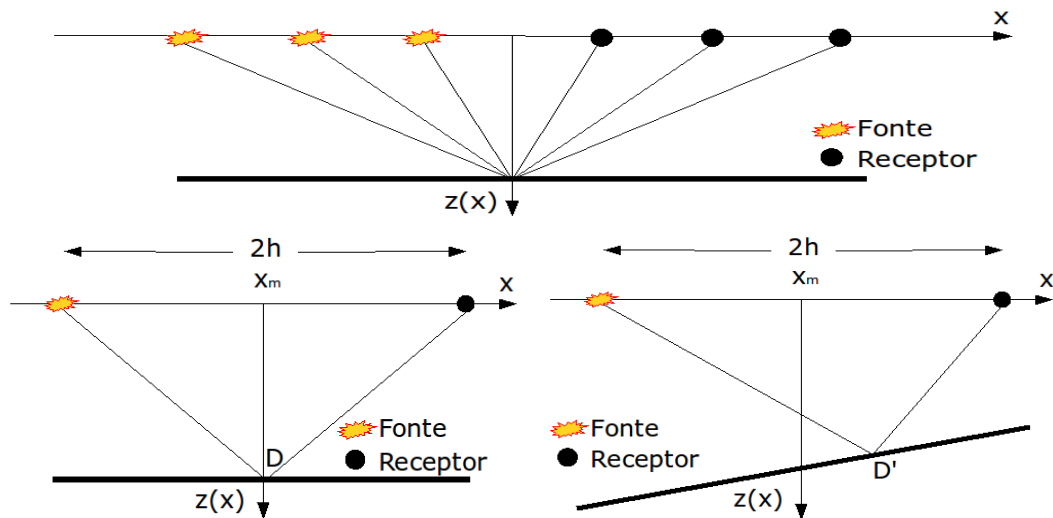


Figura 3.3: Configuração CMP. Ponto multi-iluminado em profundidade (acima). Abaixo se tem uma estimativa de como ocorre a iluminação de um seguimento por espalhamento, quando a interface refletora apresenta inclinação.

utilizando uma única embarcação, e é relativo à linha L2140270, proveniente da Bacia do Jequitinhonha, com extensão de 39.7km . Uma descrição mais detalhada da geometria de aquisição utilizada nesta linha é encontrada na Tabela 3.1. O dado foi obtido no domínio FC, a partir do qual outros tipos de domínios podem ser simulados, como: RC, CMP e AC. O domínio CMP tem destaque nas configurações do cubo de dados por ser a forma usada na análise de velocidade e no empilhamento. Neste caso, se destaca o caso de interfaces plano-horizontais para mostrar a multi-cobertura na iluminação de um ponto em sub-superfície, e o caso de uma interface plano-inclinada para mostrar o espalhamento da iluminação (ver Figura 3.3). Uma seção de interesse no processamento é a seção AN, que não pode ser obtida na prática de campo, mas é obtida no processamento sísmico através de processo de empilhamento apresentado adiante.

Tabela 3.1: Dados da geometria de aquisição.

Informações da geometria de aquisição	
Bacia	Jequitinhonha
Linha	L2140270
Ano de aquisição	1985
Configuração	Arrasto-de-cabo
Tipo de fonte	Canhão de ar
Profundidade do cabo	10.5m
Profundidade da fonte	9m
Comprimento do cabo	2975m
Número de tiros	1589
Número de receptores	120
Intervalo entre tiros	25m
Intervalo entre receptores	25m
Afastamento mínimo	150m
Afastamento máximo	3125m
Tempo de registro	7.0s
Intervalo de amostragem	4ms

3.2 MEIO E O MODELO DIRETO

A descrição do meio de propagação da onda sísmica é importante para se compreender a evolução do modelo utilizado para a descrição da sub-superfície, onde se busca construir um modelo cada vez mais próximo da realidade, começando pelo mais simples, o modelo plano-horizontal, e aumentando o nível de complexidade gradativamente com o modelo de camada plano-inclinada até o modelo de camadas curvas.

3.2.1 Camadas Plano-Horizontais

Um dos modelos mais importantes na sísmica para representar uma bacia sedimentar é o composto por camadas plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas que estejam dentro do conjunto estrutural do lançador, onde a fonte S e o receptor G são posicionados na superfície e separados de uma distância x (ver Figura 3.4). Este modelo está presente na correção e no empilhamento, onde está incluído na análise de velocidade Semblance (NEIDELL; TANER, 1971). O tempo de trânsito no trajeto SDG é dado pela equação paramétrica em função do

parâmetro horizontal p do raio:

$$t(p) = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t_i}{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}}; \quad (3.1)$$

e para a distância de emergência por:

$$x(p) = \sum_{i=1}^N \frac{v_i^2 \Delta t_i p}{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}}; \quad (3.2)$$

onde $p = \frac{\text{sen}\beta_0}{v_0} = \frac{\text{sen}\beta_i}{v_i}$, β_0 e v_0 são os parâmetros de partida, v_i a velocidade da camada, β_i o ângulo de incidência vertical (ponto da fonte); e Δt_i o tempo-duplo vertical, todos relacionados à i -ésima camada (CASTLE, 1994). Um conceito importante é o raio de curvatura da frente de onda, R_0 , que neste caso é dado por:

$$R_0(x) = \frac{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}}{v_i p} \left[x^2 + x \sum_{i=1}^{2N} z_i \left(\frac{pv_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (3.3)$$

sendo z_i a espessura da i -ésima camada. $R_0^{-1}(x)$ representa a divergência esférica responsável por uma forma de expressar a atenuação geométrica do campo (HUBRAL; KREY, 1980).

A forma prática é escrever o tempo de trânsito em termo do afastamento na forma geral $t = t(x; \mathbf{b})$, onde \mathbf{b} representa o conjunto de parâmetros do modelo. Para o caso de uma camada com velocidade v , o tempo de percurso é dado por:

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v^2} + \text{Termos de ordem superior}, \quad (3.4)$$

onde $t(0) = 2z/v$ é o tempo-duplo normal (CASTLE, 1994). Neste caso o conjunto de parâmetros do modelo é composto pela velocidade v , pelo tempo-duplo de afastamento-nulo $t(0)$ e pela espessura z da camada. A generalização da eq. (3.4) para o caso do modelo representado pela Figura 3.4 é escrita na forma:

$$t^2(x) = C_0 + C_1 x^2 + C_2 x^4 + C_3 x^6 + \dots; \quad (3.5)$$

onde $C_0 = t(0)^2$ e $C_1 = \frac{1}{v_{RMS}^2}$, e os coeficientes de grau maior são funções das espessuras e das velocidades das camadas (YILMAZ, 1988). O termo v_{RMS} é a velocidade-média-quadrática das camadas situadas acima do ponto de reflexão, e é dado por:

$$v_{RMS}^2 = \frac{1}{t(0)} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i. \quad (3.6)$$

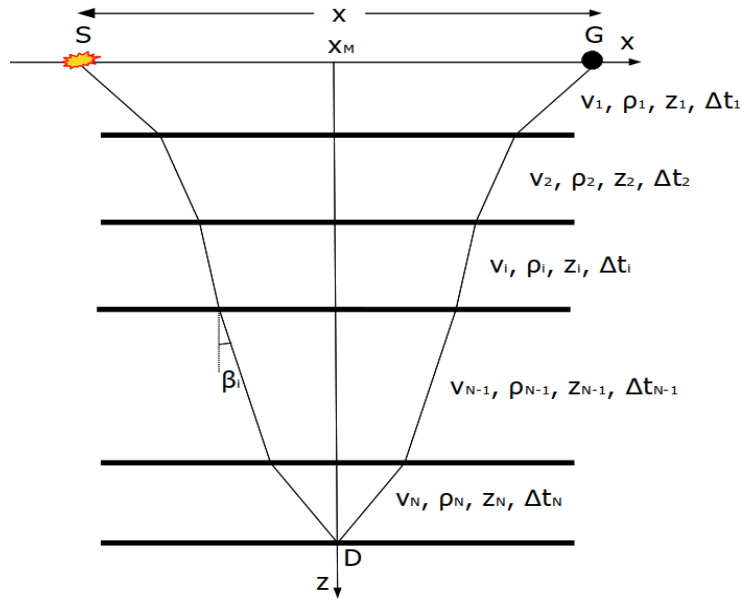


Figura 3.4: Modelo (2D) composto por N camadas com interfaces plano-horizontais e N interfaces refletoras, caracterizadas pela velocidade v_i , densidade ρ_i , espessura z_i e um tempo duplo $\Delta t_i = 2z_i/v_i$. A fonte S e o receptor G estão separados de uma distância x , e x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor.

No caso de camadas plano horizontais Dix (1955) mostrou que v_{RMS} é igual a velocidade NMO, v_{NMO} , de correção NMO. Assim, com a definição de 3.6, a eq. (3.4) pode ser generalizada para (GAJEWSKI; VANELLE, 2002):

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v_{RMS}^2} + \text{Termos de ordem superior}; \quad (3.7)$$

Segundo Shah (1973) a velocidade NMO é definida como:

$$v_{NMO}^2 = \left[\frac{d(t^2)}{d(x^2)} \right]^{-1}, \quad (3.8)$$

em $x^2 = 0$, e o termo “normal” significa que esta velocidade é medida próxima do raio normal. Isto implica que a velocidade RMS e NMO, para este caso, são iguais para pequenos afastamentos, e ainda que esta velocidade é uma boa aproximação para a velocidade de migração v_E . Assim sendo, a eq. (3.9) fica:

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v_{RMS}^2}. \quad (3.9)$$

No caso de camadas inclinadas a igualdade entre v_{RMS} e v_{NMO} não é verdadeira. Em Shah

(1973) a velocidade NMO é calculada para outros modelos, onde se nota que esta grandeza pode ter relação com a inclinação e curvaturas das interfaces refletoras. Vale observar que independente do modelo considerado a definição 3.8 é sempre válida, pois nesta não nada que relacione o tipo de modelo considerado.

O raio de curvatura é agora calculado pelas leis de reflexão e transmissão, e escrito em termos dos parâmetros na forma:

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i. \quad (3.10)$$

3.2.2 Camadas Plano-Inclinadas

Este modelo é descrito por camadas homogêneas, isotrópicas e limitadas por interfaces plano-inclinadas que estejam dentro do conjunto estrutural do lançamento (ver Figura 3.5). O tempo de trânsito da reflexão em D é dado por uma aproximação de segunda ordem na forma:

$$t^2(x) = \left[t(0) + \frac{\text{sen} \beta_0}{v_1} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{t(0) \cos^2 \beta_0}{v_1 R_0} (x_m - x_0)^2; \quad (3.11)$$

onde $t(0)$ é o tempo duplo normal NIP, relacionado à onda NIP (HUBRAL; KREY, 1980). O raio de curvatura da onda normal de trajetória $x_0 0_N$, R_0 , é dado por:

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i \prod_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right); \quad (3.12)$$

onde α e β são os ângulos verticais de incidência/transmissão (acima/abaixo) de cada interface (HUBRAL; KREY, 1980). Comparando a eq. (3.9) com a 3.11 se conclui que, para este caso, a velocidade v_{NMO} é dada por:

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_1 R_0}{t(0) \cos^2 \beta_0}. \quad (3.13)$$

3.2.3 Camadas Curvas

Este modelo é composto por camadas limitadas por interfaces curvas e contínuas dentro do lançamento (ver Figura 3.6), e sua descrição está diretamente relacionada ao empilhamento CRS

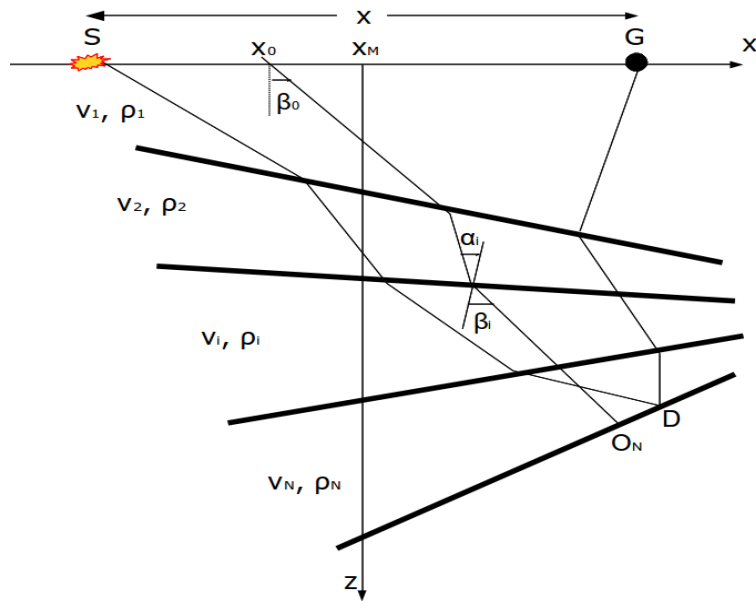


Figura 3.5: Modelo (2D) composto por camadas com interfaces refletoras plano-inclinadas. Cada camada é caracterizada por uma velocidade v_i e uma densidade ρ_i . A fonte S e o receptor G estão separados de uma distância x ; x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor; x_0 é o ponto de partida e emergência da onda normal; e α e β são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo da interface.

abordado no Capítulo 5, com o tempo de trânsito hiperbólico dado por:

$$t^2(x_m, h) = \left[t(0) + 2 \frac{\text{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + 2 \frac{t(0) \cos^2 \beta_0}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]; \quad (3.14)$$

onde $t(0)$ é o tempo-duplo normal para AN; h é o meio-afastamento fonte-receptor; v_0 é a velocidade da camada próxima ao ponto de emergência do raio; e o trio (β_0, R_N, R_{NIP}) são os atributos da frente de onda, parâmetros da equação (SHAH, 1973). A eq. (3.14) pode ser reescrita para análise por partes voltadas às componentes de velocidade, na forma:

$$t^2(x_m, h) = t^2(0) + \frac{x^2}{v_{NMO}^2} + 4t(0) \frac{\text{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) + 2t(0) \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} h^2 + \frac{(x_m - x_0)^2}{v_{CMO}^2}. \quad (3.15)$$

Com isto ficam definidas as velocidades v_{NMO} e v_{CMO} . Os dois primeiros termos da eq. (3.15) são comparados ao caso de camadas plano-horizontais, de onde se obtém que:

$$v_{NMO}^2 = \frac{v_0 R_{NIP}}{2t(0) \cos^2 \beta_0}. \quad (3.16)$$

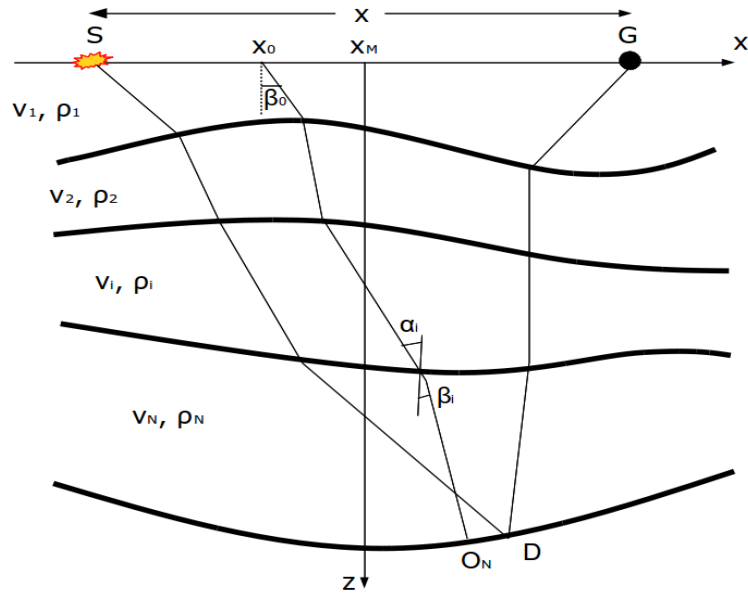


Figura 3.6: Modelo (2D) de camadas com interfaces curvas caracterizadas por uma velocidade v_i e uma densidade ρ_i . A fonte S e o receptor G estão posicionados na superfície separados de uma distância x . A coordenada x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor, x_0 é o ponto de emergência da onda e α e β são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo do refletor.

Os termos centrais carregam informações sobre o mergulho das camadas, e o último termo está relacionado à curvatura do ponto de reflexão através da velocidade v_{CMO} dada por:

$$v_{CMO}^2 = \frac{v_0 R_N}{2t(0) \cos^2 \beta_0}. \quad (3.17)$$

Para casos especiais, iniciando com $R_{NIP} = \infty$, se interpreta a eq. (3.14) para o caso de refletores plano-inclinados, que com $\beta_0 = 0$ corresponde ao caso de camadas plano-horizontais (MANN et al., 2006).

4 PROCESSAMENTO CONVENCIONAL

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos no processamento NMO da linha sísmica marinha *L2140270* da Bacia do Jequitinhonha. O fluxograma escolhido foi aquele que, dentre os testes efetuados, gerou seções com maior qualidade visual, cujo resultados são apresentados no decorrer de cada seção.

4.1 PRIMEIRA ETAPA: PRÉ-PROCESSAMENTO

A primeira etapa do processamento foi comum a todas as metodologias de empilhamento utilizadas neste trabalho, e é constituída dos processos da Tabela 4.1. Outros detalhes são dados ao longo desta seção.

4.1.1 Geometria e Edição de Traços

O dado original foi recebido com a formatação SEG Y, e foi feita sua conversão ao formato SU para compatibilizá-lo ao sistema CWP/Un*x. Após a interpretação do relatório de campo, cujo algumas informações estão na Tabela 3.1, se inseriu a geometria de aquisição no cabeçalho do dado, com informações das coordenadas das fontes, dos receptores, dos afastamentos e dos CMPs, para formar o cubo de dados e organizá-lo na forma desejada ao processamento e ao imageamento. Após isto, a edição dos traços foi iniciada com a visualização das famílias FC para a identificação de traços ruidosos e posterior silenciamento do topo das seções (ver Figura 4.2), e o dado pode ser visto na configuração afastamento-mínimo (ver Figura 4.3).

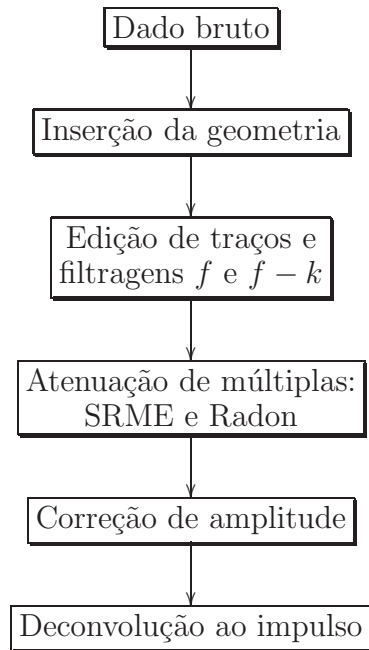


Figura 4.1: Fluxograma de pré-processamento da linha L2140270.

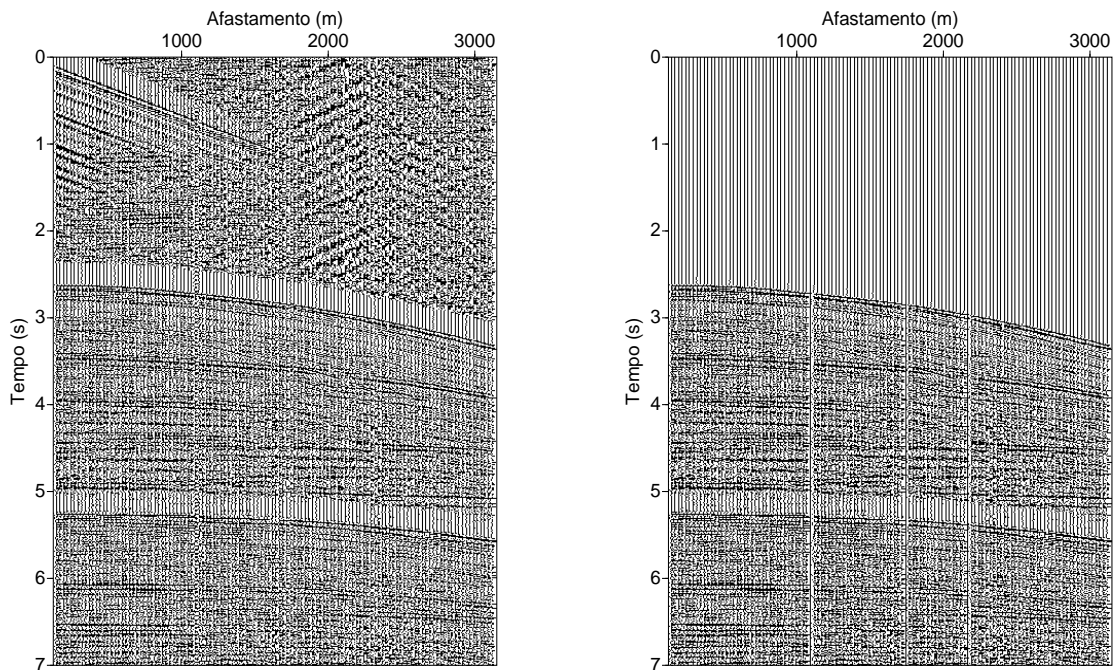


Figura 4.2: Seção FC, número 1500, antes e após o controle de qualidade, onde se verifica o silenciamento do topo da seção e o silenciamento de traços ruidosos. Observa-se a presença de eventos de reflexão com forma hiperbólica, distinta dos eventos de onda direta e de refração.

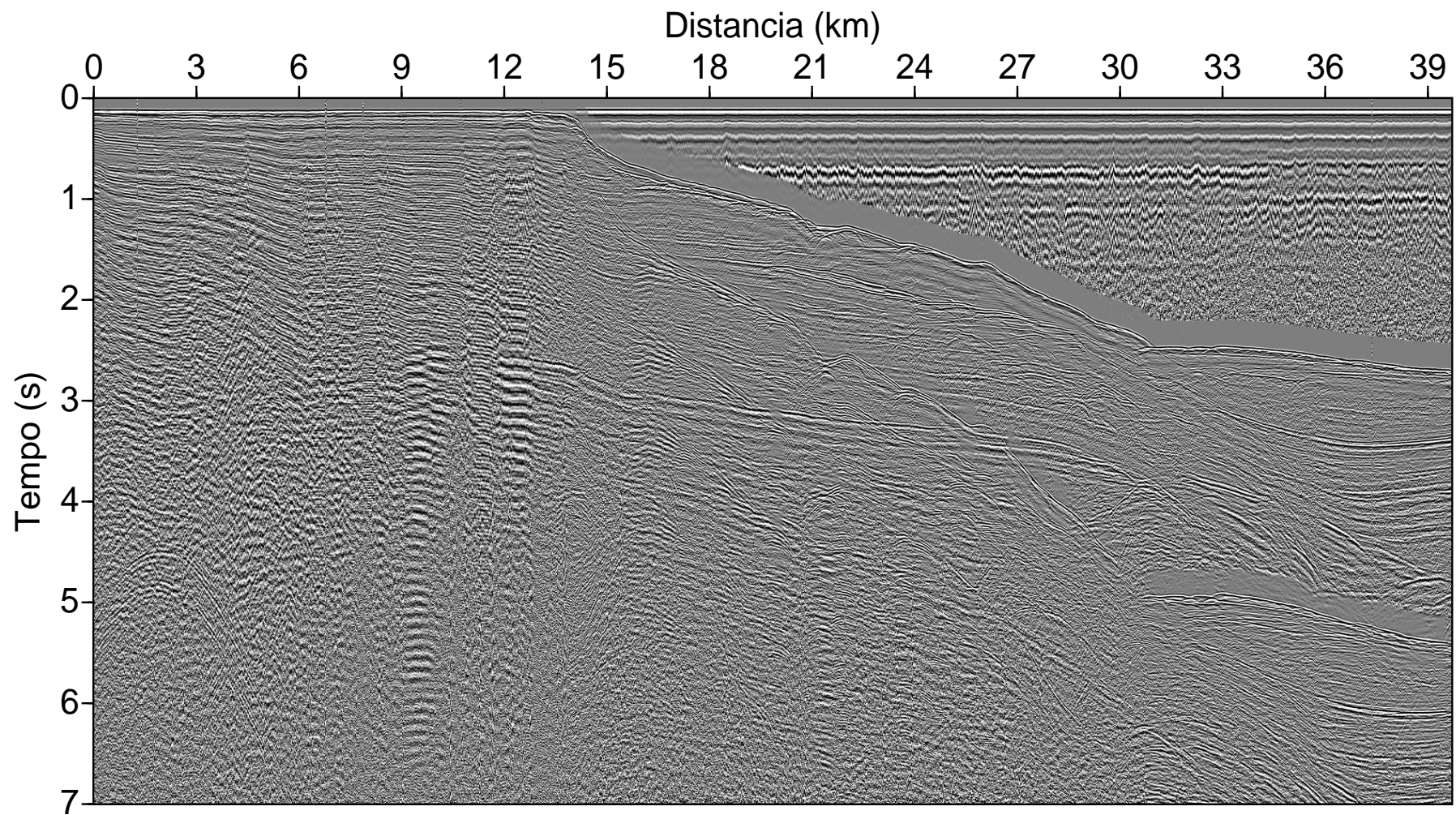


Figura 4.3: Seção afastamento-mínimo após a inserção da geometria.

4.1.2 Filtragem

Esta parte constou da aplicação de dois tipos de filtros banda-passante-trapezoidal: (1) o filtro f (no domínio da frequência temporal); e (2) o filtro $f - k$ (no domínio frequência temporal-espacial). Matematicamente este processo, no domínio f , consiste em uma multiplicação dada por:

$$S_2(f) = S_1(f)H(f); \quad (4.1)$$

onde $H(f)$ é o filtro e $S_1(f)$ a entrada, resultando no sinal filtrado $S_2(f)$ que passa a apresentar apenas o conteúdo de frequências estabelecidas em $H(f)$. No domínio t a correspondente operação é a convolução dada por (WATERS, 1986):

$$s_2(t) = s_1(t) * h(t). \quad (4.2)$$

O filtro $f - k$, representado por $H(f, k)$, é aplicado de forma similar às eqs. (4.1) e (4.2), sendo também descrito como um filtro de velocidade, e o resultado desta filtragem deve apresentar apenas eventos na banda de velocidades pré-estabelecidas (YILMAZ, 1988) (FOREL et al., 2005).

Os testes das filtrações foram feitos nas famílias FC e tiveram como finalidade eliminar/atenuar a parte interpretada como indesejável no dado, tais como onda direta, refração e onda de superfície d'água, denominadas de ruído coerente. É admitido que as frequências que trazem informações sobre a sub-superfície estão contidas numa faixa aproximadamente entre 20 a 70Hz, sendo as frequências fora deste intervalo consideradas como ruído. Após alguns testes e a análise do espectro f , escolheu-se um filtro f com frequências de corte 10 – 20 – 45 – 55Hz, onde as frequências menores que 10Hz e maiores que 55Hz foram eliminadas, restringindo o dado à banda de frequência desejada. O conteúdo espectral das 100 primeiras seções FC antes e após a filtragem f é visualizado na Figura 4.4, onde se observa que este conteúdo se estende até 125Hz, que é a frequência de Nyquist que limita a informação, estando a frequência dominante entre 25 e 30Hz. Visualizando as famílias FC pós-filtragem f se percebeu que a onda-direta e refração eram fortes na parte rasa do dado, sendo assim, optou-se por aplicar um filtro $f - k$ com a finalidade de atenuar/eliminar estes eventos. Este filtro é definido pelas inclinações que limitam o dado a uma banda de velocidade desejada a partir de suas vagarosidades, cuja definição matematicamente é dada por:

$$s = \frac{1}{v}. \quad (4.3)$$

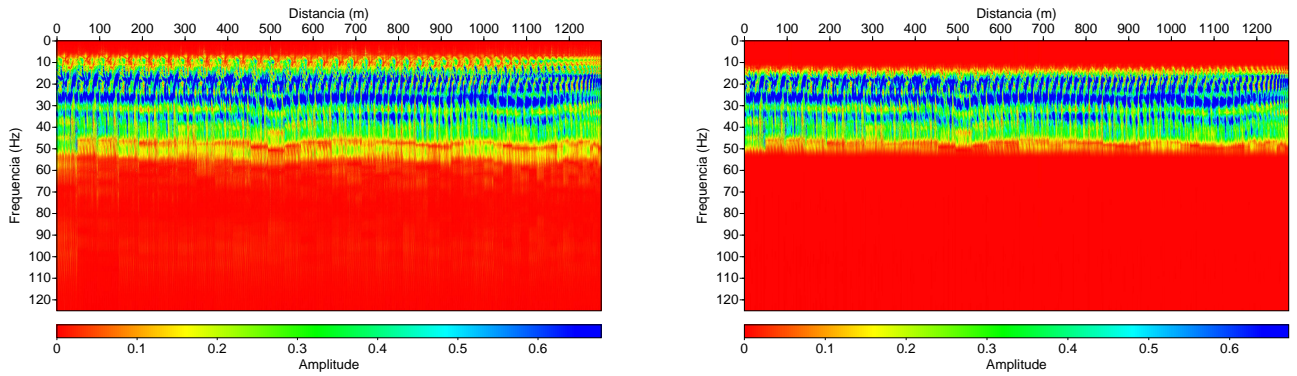


Figura 4.4: Conteúdo espectral das 100 primeiras famílias FC antes (à esquerda) e após (à direita) o processo de filtragem f com um banda-passante trapezoidal de cantos $10 - 20 - 45 - 55Hz$. Não foi aplicado ganho a estas imagens.

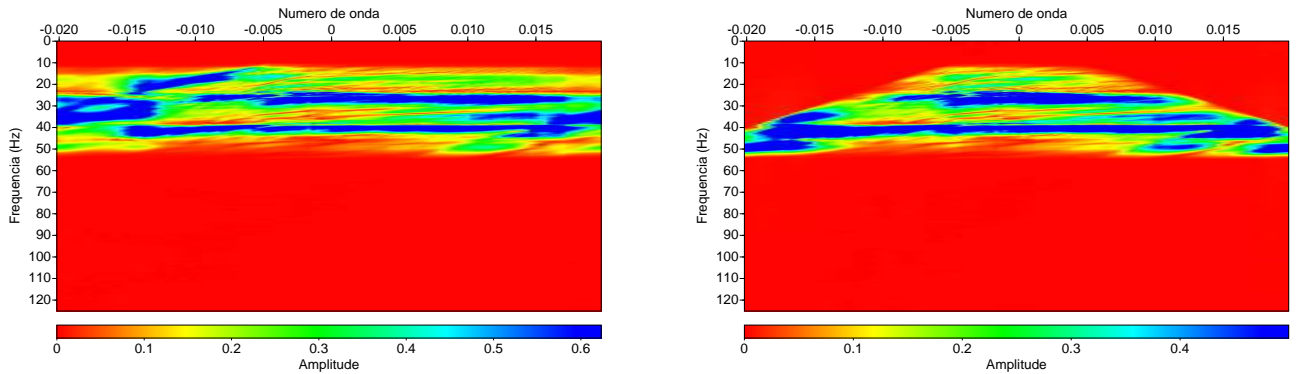


Figura 4.5: Espectro $f - k$ da seção FC, número 500, antes e após a aplicação do filtro $f - k$, banda-passante trapezoidal, com inclinações $(-0.0005, -0.00004, 0.00004, 0.0005s/m)$. Não foi aplicado ganho a estas imagens.

Após a determinação das velocidades dos eventos da faixa que se desejava atenuar/eliminar, este filtro foi desenhado com as inclinações $-0.000665, -0.00015, 0.00015, 0.000665s/m$ relacionados às velocidades de $1500m/s$ e $6000m/s$ aproximadamente, assim eliminou-se eventos com velocidades menores que $1500m/s$, como ondas de superfície por exemplo, que se propagam na superfície da água. O efeito desta filtragem, no domínio $f - k$, para uma família FC é mostrado na Figuras 4.5. O efeito de ambos os processos de filtragem em uma seção FC é visualizado na Figura 4.6, onde se percebe uma atenuação satisfatória dos eventos indesejados presentes no dado assim como a melhor distinção das primeiras chegadas.

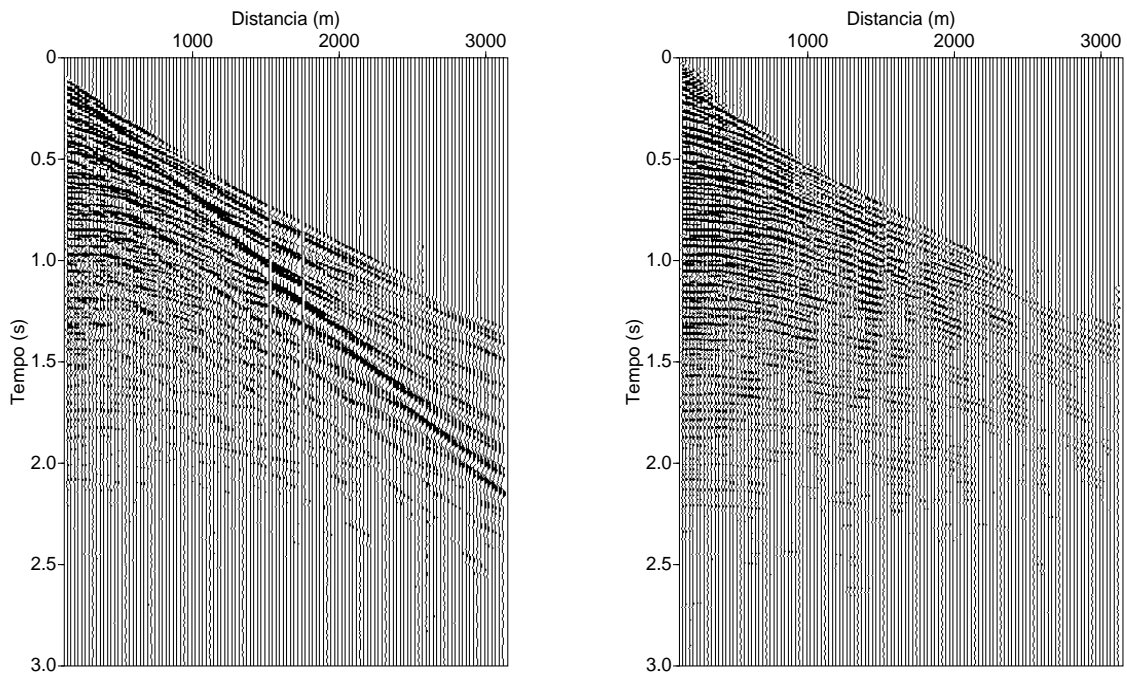


Figura 4.6: Seção FC, número 300, antes e após os processos de filtragem f e $f - k$, onde o dado foi limitado a uma banda de frequência e de velocidade, resultando numa seção com eventos de reflexão mais destacados e com eventos de onda direta e refração crítica mais atenuados.

4.1.3 Atenuação de Múltiplas

Um dos esforços para o processamento da linha está relacionado à atenuação das múltiplas de superfície livre, e para isto foram aplicados dois métodos específicos: o SRME e o Radon. A experiência mostra que o método SRME funciona bem para a eliminação de múltiplas relacionadas a grandes afastamentos, enquanto que o Radon funciona bem para pequenos afastamentos, logo o uso em conjunto de ambos os métodos é importante para uma melhor atenuação da múltipla visada.

SRME

O desenvolvimento deste método começa com Anstey e Newman (1966), que observaram que com a autocorrelação do traço, eventos primários foram transformados em múltiplas, seguido por métodos que eliminavam estes eventos para meios elásticos horizontal e para meios variando lateralmente (KENNETT, 1979).

Os parâmetros requeridos neste método são relativamente simples, relacionados a fronteira do refletor, e pode ser aplicado tanto para dados adquiridos em meios elásticos quanto em meios acústicos. No entanto, a atenção aqui é voltada para o caso marinho.

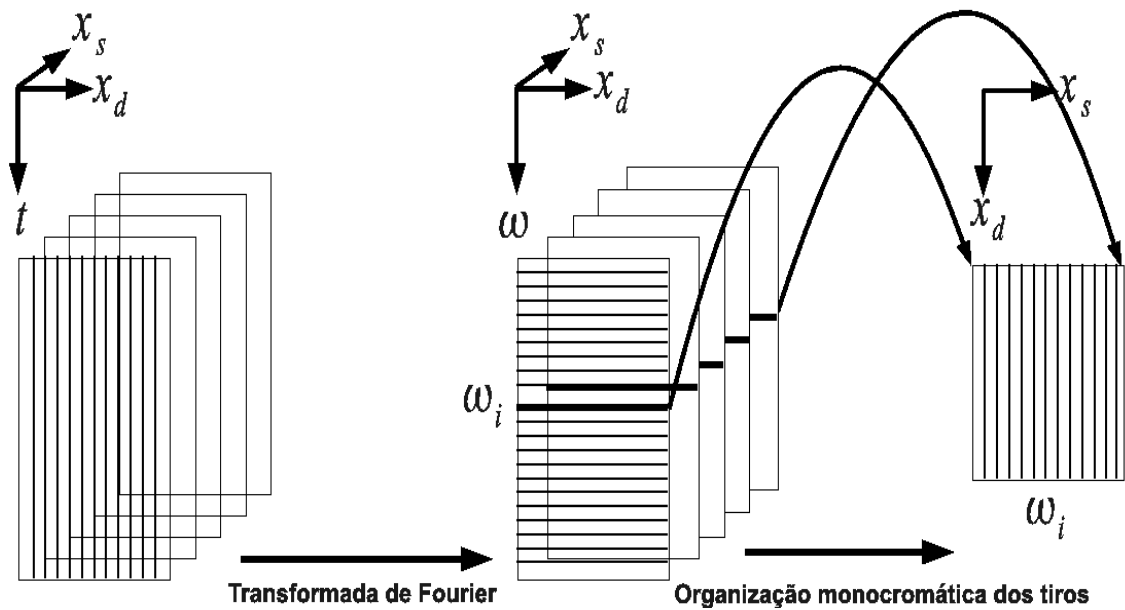


Figura 4.7: Organização das famílias FC monocromáticas. Sendo x_s a posição das fontes e x_d o afastamento. Adaptado de Verschuur 1982.

O método considera uma linha sísmica 2D com extensão fixa de N receptores e um tiro é posicionado sequencialmente em cada receptor, resultando em N famílias FC. Estas famílias FC são transformados para o domínio da frequência pela Transformada de Fourier, o que resulta em N famílias FC monocromáticas, cada uma com N amostras complexas. Estes registros são armazenados, como mostra a Figura 4.7, na coluna de uma matriz, definindo a matriz do dado para esta frequência em particular (VERSCHUUR et al., 1982).

O campo de onda $\underline{\mathbf{P}}_0^-(z_0)$ monocromático ascendentemente na superfície de referência z_0 é escrito matricialmente como

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

onde $\underline{\mathbf{S}}^+(z_0)$ é a matriz que contem o campo de onda da fonte na superfície e $\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)$ a matriz resposta ao impulso da subsuperfície para a superfície livre não-refletora (VERSCHUUR et al., 1982).

Na presença de superfície livre, uma onda ascendente chegando na superfície reflete e se transforma em uma onda descendente, assim a eq. (4.4) é escrita como

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0) \left[\underline{\mathbf{S}}^+(z_0) + \underline{\mathbf{R}}^-(z_0)\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) \right], \quad (4.5)$$

sendo $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$ o campo ascendente total na superfície z_0 , e $\underline{\mathbf{R}}^-(z_0)$ a matriz refletividade da superfície livre. Esta equação, quando isolando o termo $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$, pode ser escrita como:

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = [\underline{\mathbf{I}} - \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{R}}^-(z_0)]^{-1} \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{S}}^+(z_0), \quad (4.6)$$

que quando expandida em uma série de potência fica

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \{ \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{R}}^-(z_0) \}^n \right]^{-1} \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{S}}^+(z_0), \quad (4.7)$$

ou, pela definição de $\underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)$ como a resposta da subsuperfície ao impulso com múltiplas de superfície,

$$\underline{\mathbf{P}}^-(z_0) = \underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0)\underline{\mathbf{S}}^+(z_0). \quad (4.8)$$

Comparando esta equação com a 4.4 se percebe que o termo $\left[\sum_{n=0}^{\infty} \{ \underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)\underline{\mathbf{R}}^-(z_0) \}^n \right]^{-1}$ está relacionada à múltipla.

Para a superfície livre, no caso marinho, a refletividade é simplificada para:

$$\underline{\mathbf{R}}^-(z_0) = r_0 \underline{\mathbf{I}}, \quad (4.9)$$

onde idealmente $r_0 = -1$.

Para a remoção da múltipla do dado $\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)$, a eq. (4.6) pode ser invertida para que se possa definir uma expressão empílica para $\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)$. Sendo assim, escrevendo esta equação como um expansão em série de potência e usando a definição 4.9, temos que:

$$\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0) = \underline{\mathbf{X}}(z_0, z_0) - r_0 \underline{\mathbf{X}}^2(z_0, z_0) + r_0^2 \underline{\mathbf{X}}^3(z_0, z_0) - r_0^3 \underline{\mathbf{X}}^4(z_0, z_0) + \dots \quad (4.10)$$

Na preseça de múltiplas fortes esta expansão converge vagarosamente e a inversão se torna instável. Para resolver esta instabilidade é necessário considerar apenas um número limitado de termos, que é relacionado à ordem da múltipla a ser atenuada (VERSCHUUR et al., 1982).

É importante observar que nenhum modelo de subsuperfície é utilizado, mas apenas o dado correpondente ao campo de onda da fonte $\underline{\mathbf{X}}_0(z_0, z_0)$ e a propriedade de refletividade da superfície r_0 . O dado é utilizado como um operador de predição de múltiplas e, aparentemente, contém as informações necessárias sobre a subsuperfície para produzir as múltiplas. Para isso é necessário que o dado seja deconvolvido para o campo de onda da fonte e que tenha amplitude verdadeira.

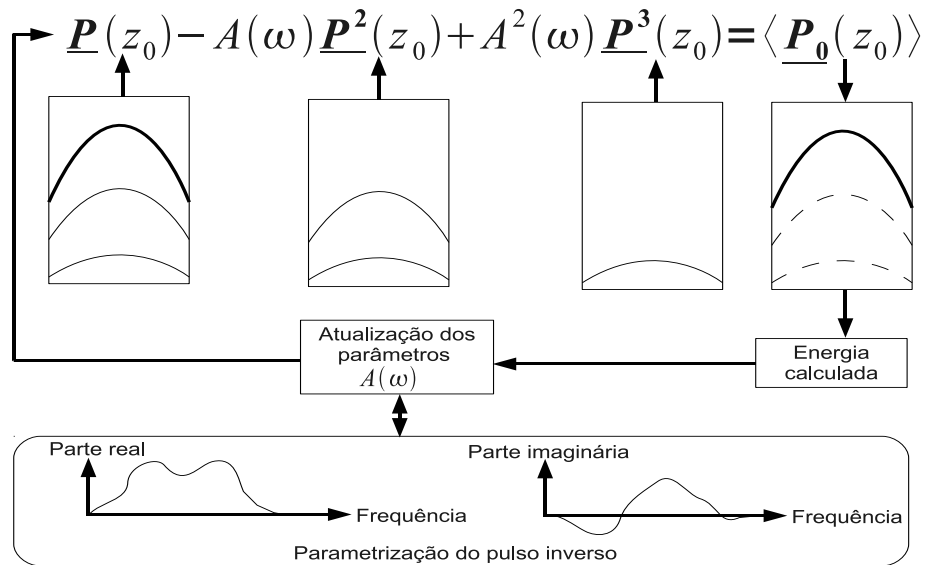


Figura 4.8: Ilustração do processo adaptativo de eliminação de múltiplas. Adaptado de Verschuur 1982.

Substituindo 4.4 e 4.8 em 4.10 e considerando que o campo de onda da fonte possa ser escrito na forma:

$$\underline{\mathbf{S}}^+(z_0) = S(\omega)\mathbf{I},$$

tem-se que

$$\underline{\mathbf{P}}_0(z_0) = \underline{\mathbf{P}}^-(z_0) - A(\omega)[\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)]^2 + A(\omega)^2[\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)]^3 - A(\omega)^3[\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)]^4 + \dots,$$

sendo $A(\omega) = r_0 S(\omega)$ um fator relacionado à superfície, que é fonte das múltiplas, e que deve deconvolver os termos $[\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)]^2$, $[\underline{\mathbf{P}}^-(z_0)]^3$ etc, de forma que as múltiplas previstas coincidam em amplitude e fase com as presentes no dado, e que possam ser subtraídas como mostra 4.11. Este fator deve ser estimado juntamente com o processo de eliminação das múltiplas numa forma adaptativa, no sentido de que $A(\omega)$ deva ser dado de forma que melhor elimine as múltiplas (ver Figura 4.8).

Para o caso de dados marinhos, os receptores são localizados na ordenada z_d abaixo da superfície livre e detecta o campo de onda total. Para um registro monocromático o campo registrado é escrito como $\mathbf{P}(z_d)$, que é uma coluna de $\underline{\mathbf{P}}(z_d)$, e fazendo a transformada de Fourier de $\mathbf{P}(z_d)$ na direção x se tem $\underline{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega)$, que é a soma dos campos ascendentes e descendente (depois da reflexão na superfície livre) $\underline{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega)$ e $\underline{\mathbf{P}}^+(k_x, z_d, \omega)$. Usando o

operador de deslocamento de fase para a propagação se tem que:

$$\underline{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega) = \underline{\mathbf{P}}^-(k_x, z_d, \omega) \left[1 + r_0 e^{-2jK_z \Delta z} \right], \quad (4.11)$$

sendo $k_z = (k^2 - k_x^2)^{\frac{1}{2}}$, $k = \frac{\omega}{c} = 2\pi \frac{f}{c}$ e $\Delta z = |z_d - z_0|$ (VERSCHUUR et al., 1982). Invertendo 4.11 se obtém o campo ascendente em $z = z_d$ como

$$\underline{\mathbf{P}}(z_d)^- = \frac{1}{1 + r_0 e^{-2jk_z \Delta z}} \underline{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega). \quad (4.12)$$

Para a remoção dos eventos de múltipla o campo de onda dado por 4.12 deve ser extrapolado para a superfície livre $z = z_0$, o que é feito pela aplicação de um operador que executa o deslocamento de fase simples $e^{-jk_z \Delta z}$. Desta forma se obtém o operador de decomposição acústica desejado na forma

$$\underline{\mathbf{P}}(z_0)^- = \frac{e^{-jk_z \Delta z}}{1 + r_0 e^{-2jk_z \Delta z}} \underline{\mathbf{P}}(k_x, z_d, \omega). \quad (4.13)$$

que remove os eventos de múltiplas e extrapola o campo ascendente da superfície fantasma para $z = z_0$.

Radon

A supressão de múltiplas usando um variante da transformada de Radon difere da transformada de Radon clássica na superfície de integração que é curva e não plana (BEYLKIN, 1992). A transformada direta separa as chegadas sísmicas por suas diferenças na curva de tempo de trânsito e a múltipla pode ser suprimida por uma transformada inversa de somente uma parte do dado.

O procedimento para supressão de múltiplas usando uma transformada hiperbólica usa o princípio de empilhamento de famílias corrigidas NMO (NMOC) sobre uma faixa da superfície hiperbólica. A transformada direta é calculada pela aplicação de um filtro convolucional no dado empilhado. Se as primárias e as múltiplas têm curvas diferentes, elas aparecerão em diferentes regiões no domínio da transformada Radon. Uma outra superfície comumente considerada para este processo é a parabólica, porém no domínio NMOC a curva residual da múltipla é mais próximo, no começo, da hiperbólica do que da parabólica. Além do mais, a aproximação parabólica é mais precisa para eventos mais rasos, enquanto a hiperbólica para tempos em volta do afastamento igual à profundidade.

A transformada Radon é definida matematicamente por

$$\check{f}(p, \tau) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x, \tau + p\theta(x)) dx, \quad (4.14)$$

sendo f o sismograma original, \check{f} a transformada, x uma variável espacial, τ o tempo de intercepção, θ uma função que controla a curva usada no empilhamento e p um parâmetro do dado, cuja interpretação pode mudar de acordo com a parametrização da curva, no caso da transformada Radon clássica este parâmetro também pode ser interpretado com a distância entre a origem do sistema de coordenadas até uma reta (DEANS, 1993). A eq. (4.14) se reduz a transformada Radon clássica quando o limite de integração é infinito e $\theta(x) = x$.

Aplicando a transformada de Fourier na equação 4.14 se tem que

$$\check{F}(p, \omega) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} F(x, \omega) e^{i\omega p\theta(x)} dx. \quad (4.15)$$

Que mostra que a integração ao longo da linha curva no domínio do tempo é representado por uma integração de deslocamento de fase no domínio da transformada Radon. Na forma discreta a eq. (4.15) é escrita como:

$$\check{F}(p_j, \omega) = \sum_{k=1}^N F(x_k, \omega) e^{i\omega p_j \theta(x_k)} \Delta x_k; \quad (k = 1, 2, \dots, N). \quad (4.16)$$

que é representado de forma mais compacta por:

$$\check{\mathbf{F}}_\omega(p_j) = \mathbf{R}\mathbf{F}_\omega(\theta(x_k)). \quad (4.17)$$

Os elementos da matriz \mathbf{R} , de dimensão $M \times N$ são dados por:

$$R_{jk} = e^{i\omega p_j \theta(x_k)} \Delta x_k. \quad (4.18)$$

A fórmula de inversão da eq. (4.17) pelo método dos mínimos quadrados é dado por

$$\mathbf{F}_\omega(\theta(x_k)) = [\mathbf{R}^* \mathbf{R}]^{-1} \mathbf{R}^* \check{\mathbf{F}}_\omega(p_j), \quad (4.19)$$

e outra forma para a sua formulação é

$$\mathbf{F}_\omega(\theta(x_k)) = \mathbf{R}^* \check{\mathbf{F}}_\omega(p_j), \quad (4.20)$$

onde $\underline{\mathbf{R}}^*$ é o Hermitiano conjugado de $\underline{\mathbf{R}}$. Uma transformada similar diz que a solução da eq. (4.20) é dada por (THORSON, 1985)

$$\check{\mathbf{F}}_\omega(p_j) = [\underline{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{R}}^*]^{-1} \underline{\mathbf{R}} \mathbf{F}_\omega(\theta(x_k)). \quad (4.21)$$

O uso das eqs. (4.20) e (4.21) é mais eficiente do que o uso de 4.17 e 4.19, uma vez que o espectro dos eventos hiperbólicos são melhores resolvidos, o que é importante na filtragem das múltiplas (FOSTER; MOSHER, 1992).

Pela parametrização da curva de um evento não-desejado no sismograma, a energia deste evento pode ser seletivamente transformada, reproduzida (transformada inversa) e retirada do dado original. O dado indesejado aqui é a reflexão múltipla e estes eventos possuem uma curva de trânsito de formato hiperbólico, com respectivo tempo de trânsito e afastamento. Matematicamente, o fator da função do tempo de retardo, $\theta(x_k)$, é dado por:

$$\theta(x_k) = [x_k^2 + z_{ref}^2]^{\frac{1}{2}} - z_{ref}, \quad (4.22)$$

onde x_k é a posição do receptor e z_{ref} um parâmetro constante definido como a profundidade de referência que controla a diferença entre esta hipérbole e as ondas refletidas, e quanto menor esta diferença mais compactos os eventos aparecerão no domínio da transformada Radon. Com o valor de z_{ref} , eventos refletidos nesta profundidade serão otimamente resolvidos. A suposição básica para este processo é que a reflexão múltipla é diferente da primária, quando estes eventos são separados no domínio da transformada Radon eles podem ser distinguidos. O algoritmo de remoção das múltiplas primeiro requer uma estimativa de onde a energia múltipla é encontrada no domínio da transformada Radon, então a onda transformada é calculada por 4.21. Após a estimativa da múltipla é feita a transformada inversa por 4.20 ao longo dos parâmetros que contém a energia múltipla, que é subtraída do dado original (ver Figura 4.9).

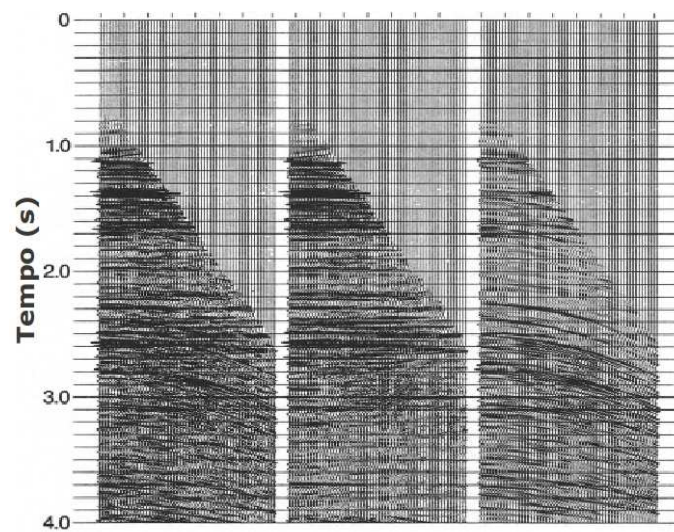


Figura 4.9: A imagem da esquerda mostra uma família CMP corrigida NMO. A imagem da direita mostra as múltiplas estimadas contidas na seção. E por fim a imagem central mostra o resultado da subtração entre o dado original e as múltiplas estimadas.

Neste trabalho, quando se trata de múltiplas os esforços se concentraram para a atenuação da múltipla relacionada à superfície livre, e o resultado desta etapa pode ser vista nas Figuras 4.10 e 4.11 que mostram as seções afastamento-mínimo antes e após a aplicação das técnicas de tratamento de múltipla onde se percebe uma considerável atenuação da múltipla de superfície livre indicada or M1 em na Figura 4.10.

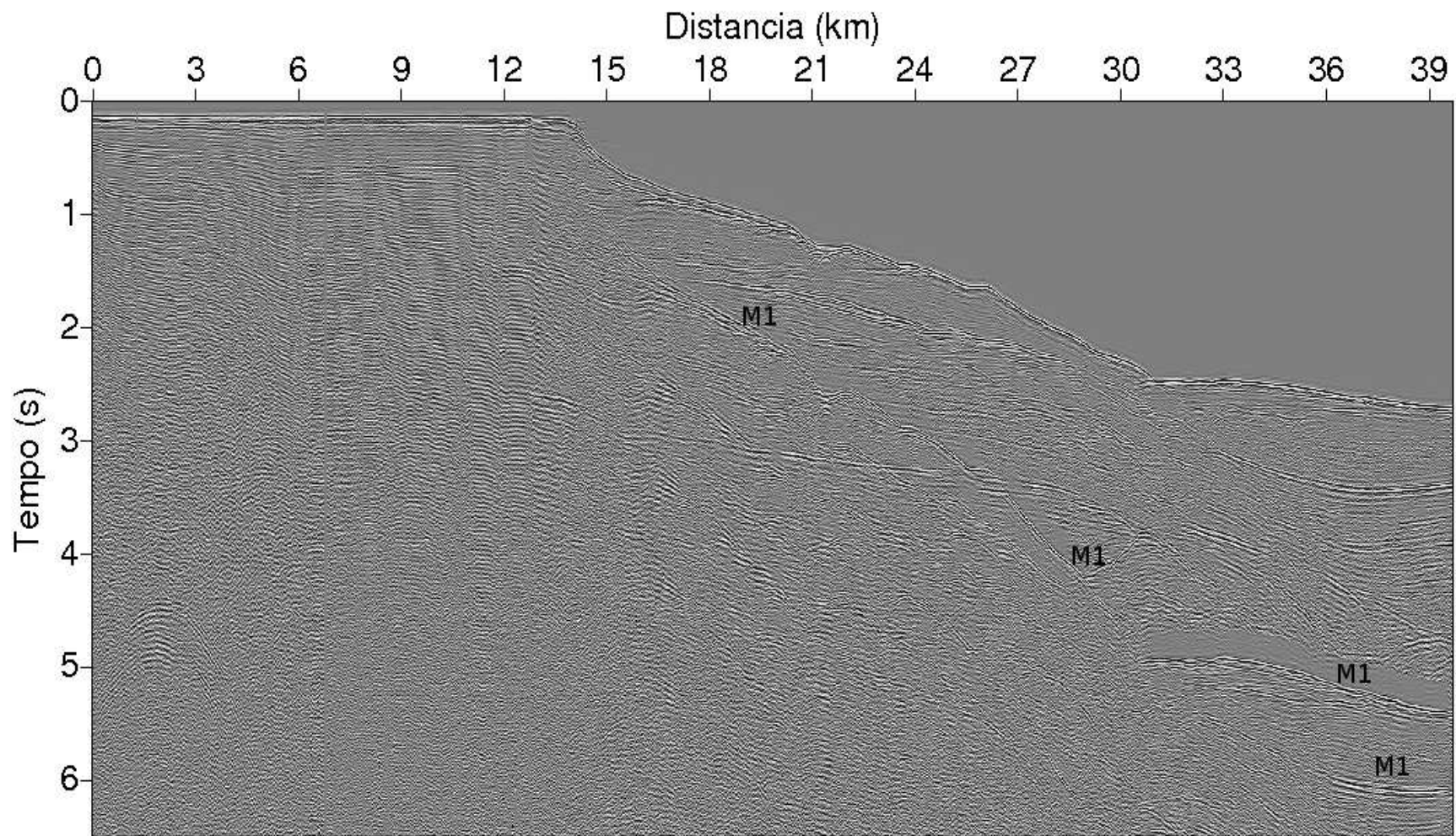


Figura 4.10: Seção afastamento-mínimo antes dos processos de SRME e Radon.

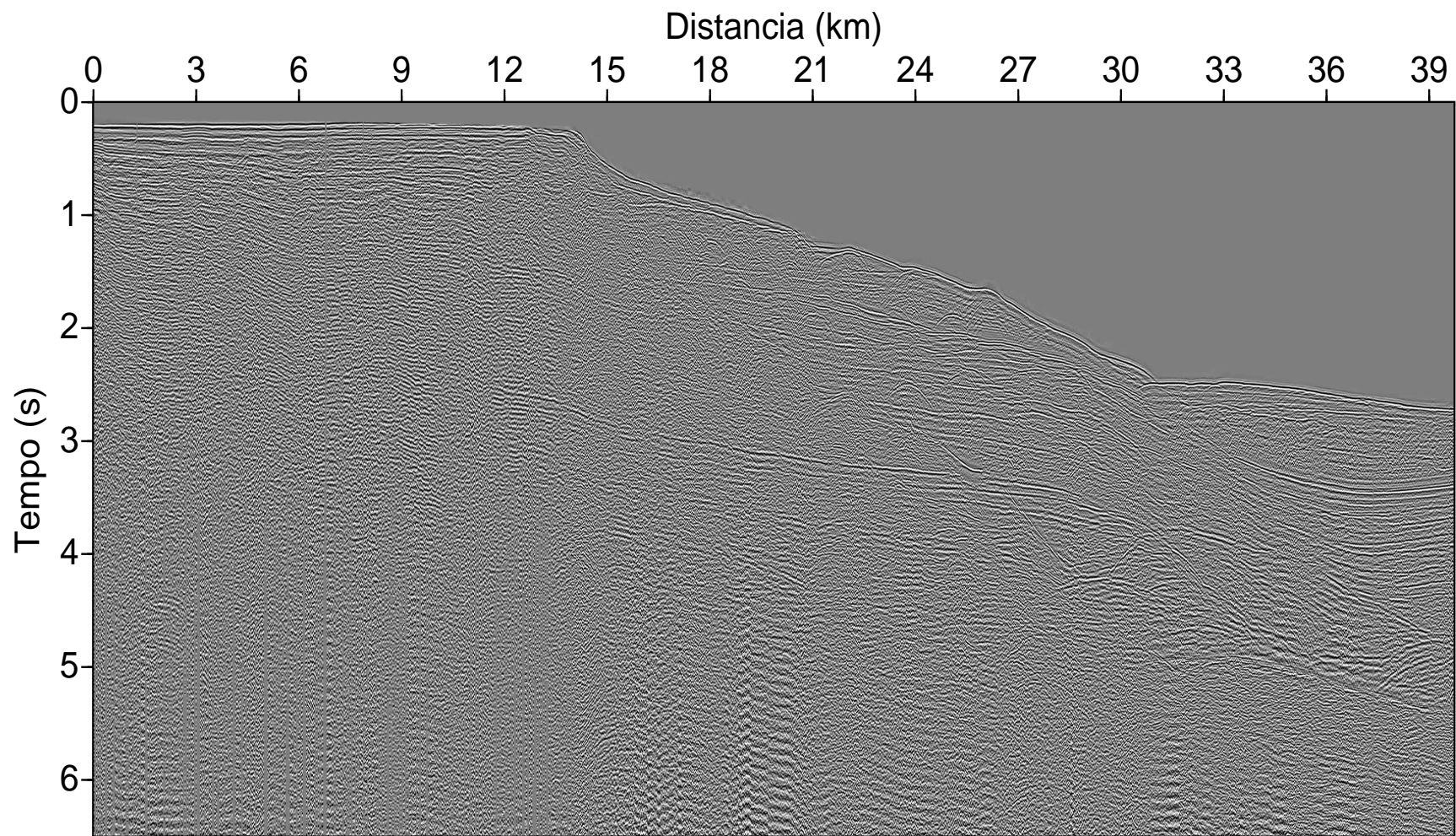


Figura 4.11: Seção afastamento-mínimo após os processos de SRME e Radon.

4.1.4 Correção de Amplitude

Cocomitante à propagação da onda sísmica na subsuperfície acontece o decaimento da amplitude do traço sísmico, este decaimento pode ser explicado por diversos fatores, como o espalhamento da frente de onda e a conversão da energia sísmica E em outras formas de energia, como a térmica por exemplo (YILMAZ, 1988). Para se obter um dado de melhor qualidade o decaimento de amplitude deve ser compensado por algum processo específico. No caso deste trabalho foi utilizado o processo de correção de espalhamento geométrico que aumenta a amplitude do traço (AKI; RICHARDS, 1980) (NEWMAN, 1973). Visando a melhora na qualidade visual do dado se aplicou uma forma de correção de amplitude geométrica. Embora o fenômeno sísmico real seja em três dimensões (3D), se pode assumir um modelo geológico em duas dimensões (2D) para uma fonte pontual, assim o espalhamento geométrico relativo é dado por (URSIN, 1990):

$$(\det Q)^{1/2} = (g^\perp g^\parallel)^{1/2}, \quad (4.23)$$

onde o espalhamento geométrico fora do plano é dado por:

$$q^\perp = \int_s^{s_0} v(s) ds; \quad (4.24)$$

que é uma integral ao longo do raio descrito por s , e v a velocidade ao longo deste raio. O espalhamento geométrico no plano é calculado pela solução de uma equação diferencial de Riccati ao longo do raio dadas as condições de contorno nas interfaces (URSIN, 1990). Considerando um modelo de camadas horizontais o espalhamento geométrico fora do plano é dado por:

$$q^\perp = \frac{x}{p}; \quad (4.25)$$

sendo x o meio-afastamento e p o parâmetro do raio. Assim sendo, o fator de correção de amplitude é dado por:

$$(q^\perp)^{-1/2} = \left(\frac{p}{x}\right)^{1/2} = \left(\frac{1}{x} \frac{dt}{dx}\right)^{1/2}, \quad (4.26)$$

sendo t o tempo de trânsito hiperbólico, logo:

$$(q^\perp)^{-1/2} = \frac{1}{\bar{v}\sqrt{t(x)}}. \quad (4.27)$$

sendo \bar{v} a velocidade média. Além da velocidade o fator de correção também depende do tempo-duplo dos eventos através do tempo de trânsito hiperbólico dado pela eq. 3.9, estes parâmetros são obtidos pela análise de velocidade (o modelo de velocidade utilizado neste processo não é o mesmo utilizado no empilhamento NMO e migração). O dado é multiplicado pelo fator de correção geométrica e a Figura 4.12 mostra um exemplo de como este processo modificou o dado, realçando os eventos de reflexão mais profundos.

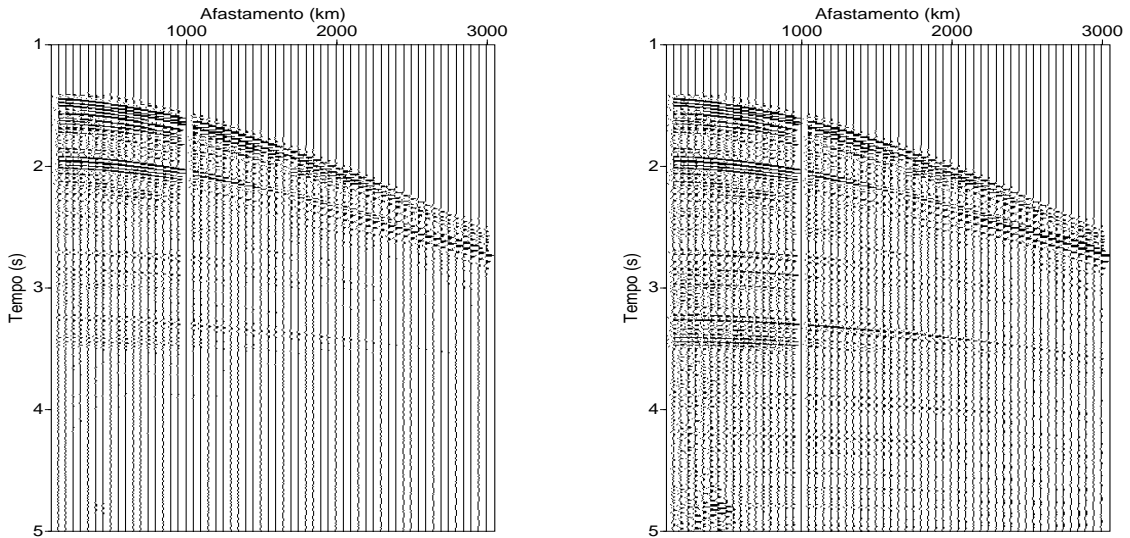


Figura 4.12: Família CMP número 2000 antes e após a correção de amplitude.

4.1.5 Deconvolução Preditiva e ao Impulso

A deconvolução preditiva é baseada no filtro ótimo, $h(t)$, que tem por princípio minimizar a diferença entre a saída real, $y(t)$, e a saída desejada, $d(t)$ (ver Figura 4.13), no sentido dos quadrados-mínimos, o que é expresso na forma discretizada por:

$$L(h) = \sum_{i=1}^M [d_i - y_i]^2, \quad (4.28)$$

onde M é o comprimento das séries temporais d_i e y_i . A saída real é dada pela convolução de s_i com o filtro h_i na forma:

$$y_i = \sum_{j=1}^{N_h} h_j s_{i-j}, \quad (4.29)$$

onde N_h e N_s são, respectivamente, o comprimento do filtro e o da entrada, logo $M = N_h + N_s - 1$. Sendo assim, a eq. (4.28) é reescrita como:

$$L(h) = \sum_{i=1}^M (d_i - \sum_{j=1}^{N_f} h_j s_{i-j})^2. \quad (4.30)$$

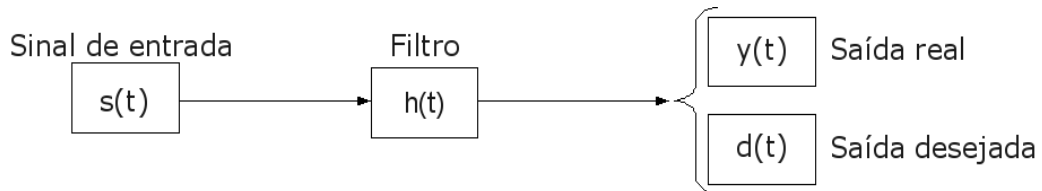


Figura 4.13: Ilustração do processo de filtragem ótima onde $s(t)$ representa a entrada, $h(t)$ o filtro, $y(t)$ a saída real e $d(t)$ a saída desejada.

A função desajuste $L(h)$, objeto de minimização, é côncava, positiva, e o método de minimização de $L(h)$ para obtenção dos coeficientes h_i é baseado na nulidade da primeira derivada desta função em relação aos coeficientes do filtro na forma:

$$\frac{\partial L(h)}{\partial h_q} = 0, \quad q = 1, 2, \dots, N_h. \quad (4.31)$$

Desta operação se obtém o sistema de equações dado por:

$$\sum_{j=1}^{N_h} h_j \phi_{i-j}^{ss} = \phi_j^{sd}; \quad i = 1, 2, \dots, N_h, \quad (4.32)$$

onde ϕ^{ss} é a autocorrelação da entrada e ϕ^{sd} a correlação cruzada entre a entrada e a saída desejada (PEACOCK; TREITEL, 1969). A matriz autocorrelação é do tipo Toeplitz, e os coeficientes do filtro h_j podem ser calculados pelo método da recursão de Levinson baseada na forma matricial correspondente à eq. (4.32):

$$\mathbf{AH} = \mathbf{C}, \quad (4.33)$$

onde $A_{ij} = \phi_{i-j}^{ss}$, $H_j = h_j$ e $C_j = \phi_j^{sd}$. Um caso específico é considerar a saída desejada como a entrada deslocada de α , escrita como:

$$d_i = s_{i+\alpha}. \quad (4.34)$$

Nesse caso, a eq. (4.32) fica na forma:

$$\sum_{j=1}^{N_h} h_j \phi_{i-j}^{ss} = \phi_{i+\alpha}^{ss}. \quad (4.35)$$

A solução da eq. (4.35) fornece o filtro ótimo com comprimento de predição α que estima o valor de uma amostra em $j + \alpha$ a partir de um conjunto de amostras anteriores até j (LEITE, 1998). A partir dos coeficientes h_i se pode estimar o filtro erro de predição a_i na forma:

$$a_i = (1, \underbrace{0, 0, 0, \dots, 0}_{\alpha-1}, -h_1, -h_2, -h_3, \dots, -h_{N_h}). \quad (4.36)$$

Este filtro executa a eliminação/atenuação na forma de deconvolução entre o filtro e a entrada, que tem como resíduo:

$$e_i = \sum_{j=1}^{N_a} a_j s_{i-j}, \quad (4.37)$$

onde o comprimento do filtro a_i é $N_a = N_h + \alpha$. Este filtro elimina a parte preditível como múltiplas, e sua aplicação é na forma de convolução numa janela temporal especificada onde as múltiplas acontecem. A análise da eficiência do filtro é feita através da autocorrelação do dado, onde estima-se também os comprimentos N_h e α que melhor eliminem o sinal indesejado.

Um caso específico do processo de deconvolução é quando o comprimento de predição é muito pequeno, neste caso se tem a deconvolução ao impulso, cujo objetivo é comprimir o pulso efetivo da fonte contido no traço sísmico visando a melhora na resolução temporal do dado (YILMAZ, 1988). Este caso foi considerado para o fluxo de processamento desta linha, e foi utilizada/testada em várias formas: (1) antes do empilhamento (antes da análise de velocidade); (2) após o empilhamento; (3) e antes e após o empilhamento. A primeira forma gerou resultados com melhor razão sinal/ruído, implicando em uma melhora na resolução temporal do dado notado através da análise da autocorrelação, das seções CMP e da seção afastamento-mínimo. Através da análise da autocorrelação (ver Figura 4.14) definiu-se o número de pontos do filtro de predição e o número de pontos do comprimento de predição como $N_h = 85$ e $\alpha = 2$ respectivamente, resultando num filtro com comprimento de 0.34 s e com comprimento de predição de 0.008 s. A escolha destes valores é feita de forma bastante prática, e para a escolha do comprimento de predição foram testados valores por volta do tempo que marca o segundo zero da função de autocorrelação (ROBINSON; TREITEL, 2000). Já para a escolha do comprimento do filtro foram efetuados testes com valores maiores que o valor de tempo que determina o máximo da função de autocorrelação (COHEN;

STOCKWELL, 2005), neste caso se efetuou testes com valores acima de 0.2 s.

A Figura 4.15 mostra a seção CMP 2000 antes e após a deconvolução, onde foram destacadas algumas regiões onde se percebe a melhora da resolução temporal imprimida pelo processo de deconvolução ao impulso pré-empilhamento, mostrando eventos de reflexão pouco percebidos no dado pré-deconvolução.

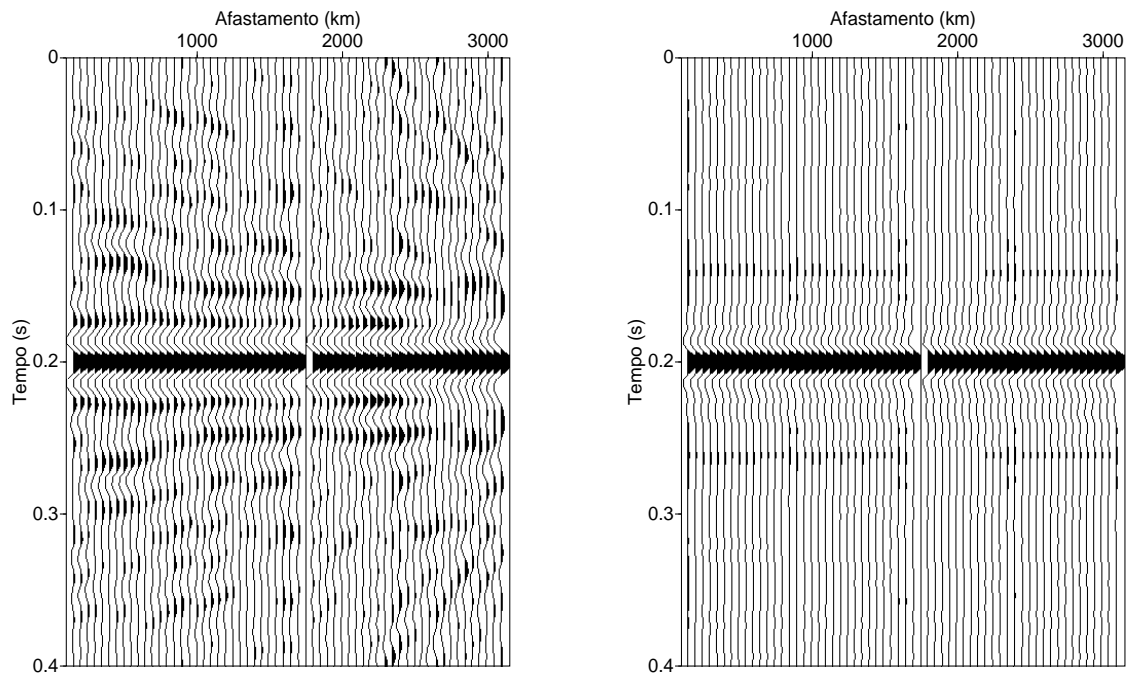


Figura 4.14: Função auto-correlação da família CMP número 2000 antes e após a deconvolução ao impulso.

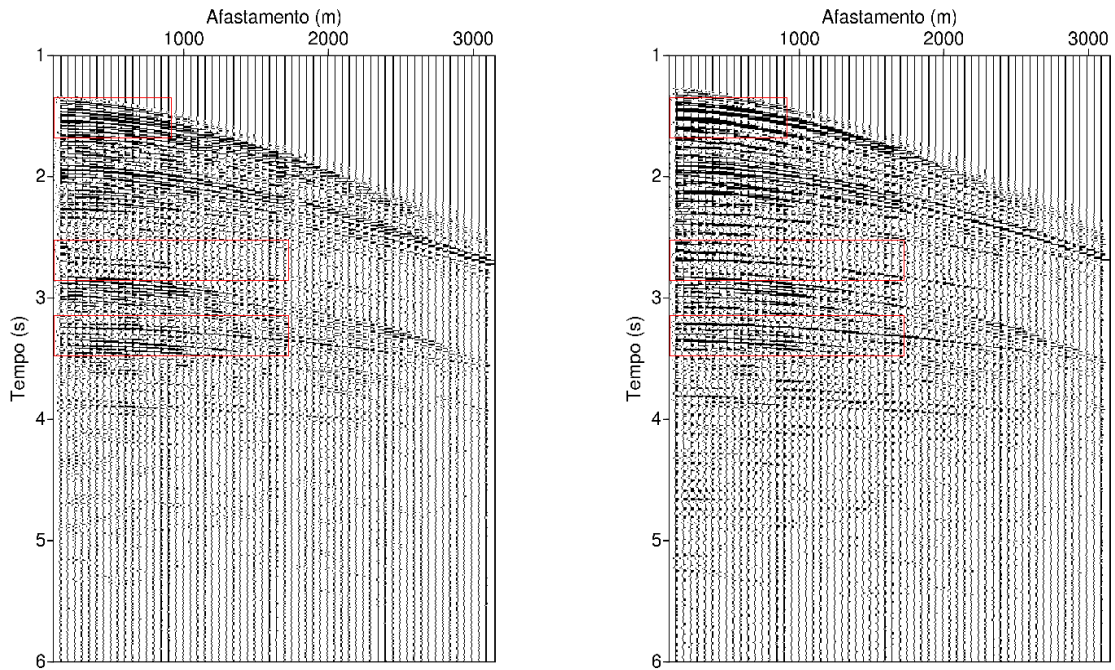


Figura 4.15: Família CMP número 2000 antes e após a deconvolução ao impulso visualizadas na janela temporal de 1 a 6s.

4.2 SEGUNDA ETAPA: PROCESSAMENTO

Nesta etapa foram utilizadas diferentes técnicas para o processamento do dado de saída da etapa anterior, sendo agora aplicadas a análise de velocidade, correção NMO, empilhamento e migração no tempo. Na Figura 4.16 é visualizada a sequência que gerou resultados melhores.

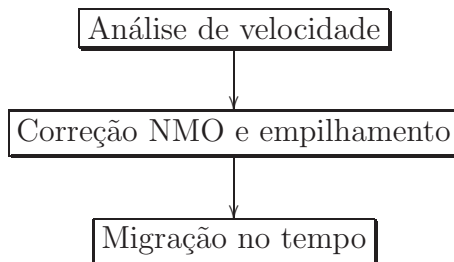


Figura 4.16: Fluxograma da segunda etapa do processamento da linha L2140270. Como principais resultados desta etapa temos o dado empilhado e migrado.

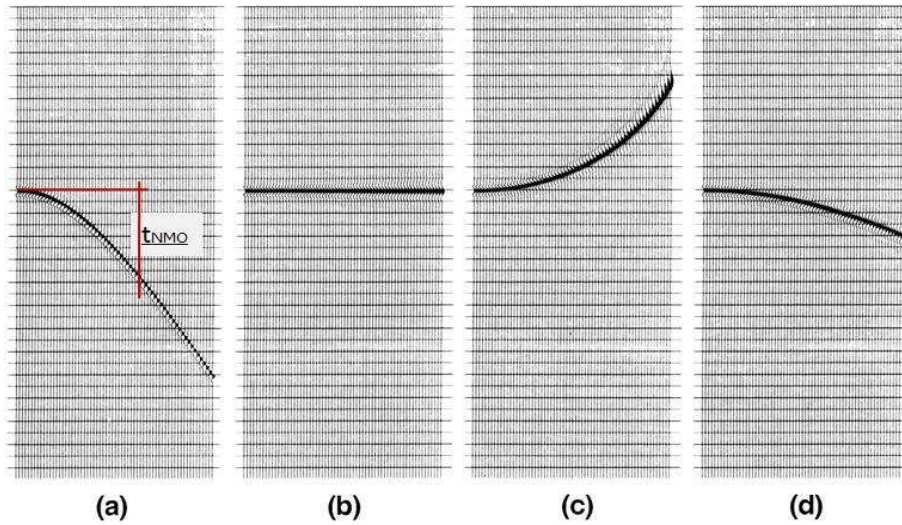


Figura 4.17: Família CMP. (a) Evento de uma reflexão primária com forma hiperbólica representada pela eq. (3.9). (b) Resultado da correção NMO onde a horizontalização do evento indica que a v_{NMO} escolhida foi correta. (c) Resultado da correção NMO indicando que a v_{NMO} escolhida foi baixa. (d) Resultado da correção NMO indicando que a v_{NMO} escolhida foi alta.

4.2.1 Análise de Velocidade e Empilhamento

A estimativa da distribuição de velocidade na seção sísmica usa o dado organizado em família CMP, usa a medida semblance, faz a correção NMO, realiza o empilhamento e pode ser usada na migração. A correção NMO é baseada no modelo de camada plano, cujo tempo de trânsito de reflexão de uma onda primária tem forma hiperbólica definida pelo sobre-tempo-normal em relação a $x = 0$, Δt_{NMO} , e expressa por:

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t(0); \quad (4.38)$$

que a partir da eq. (3.9) fica na forma (YILMAZ, 1988),

$$\Delta t_{NMO} = t(0) \left\{ \left[1 + \left(\frac{x}{t(0)v_{NMO}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}. \quad (4.39)$$

Na aplicação de Δt_{NMO} se busca a horizontalização dos eventos hiperbólicos em relação à $t(0)$ ajustando o parâmetro v_{NMO} (ver Figura 4.17).

A estimativa de velocidade é realizada acoplada ao mapa semblance, $S(x_0, t_0; v_0)$, que

mede a coerência no intervalo $[0, 1]$, e é dada por:

$$S(x_0, t_0; v_0) = \frac{\sum_{t=t_0-\delta t/2}^{t_0+\delta t/2} \left[\frac{1}{N} \sum_{h=h_0}^{\delta h} \bar{u}(x_0, h, t; v_0) \right]^2}{\sum_{t=t_0-\delta t/2}^{t_0+\delta t/2} \frac{1}{N} \sum_{h=h_0}^{\delta h} [\bar{u}(x_0, h, t; v_0)]^2}, \quad (4.40)$$

onde $\bar{u}(x_0, h, t; v_0)$ é a amplitude do traço ao longo da trajetória de empilhamento, \sum_t e \sum_h definem as janelas temporal-espacial dentro da qual se ajusta a curva que melhor representa o evento de reflexão, e N é o número de traços envolvidos. Os pares (v_{NMO}, t) devem ser marcados no mapa semblance em conjunto com a análise dos eventos de reflexão, e cada evento é relacionado a um par que melhor o horizontaliza (ver Figura 4.19), assim se forma o modelo de velocidades NMO utilizado, primeiramente, no empilhamento e, posteriormente, na migração. A Figura 4.18 mostra o modelo de velocidade NMO suavizado utilizado no empilhamento NMO do dado.

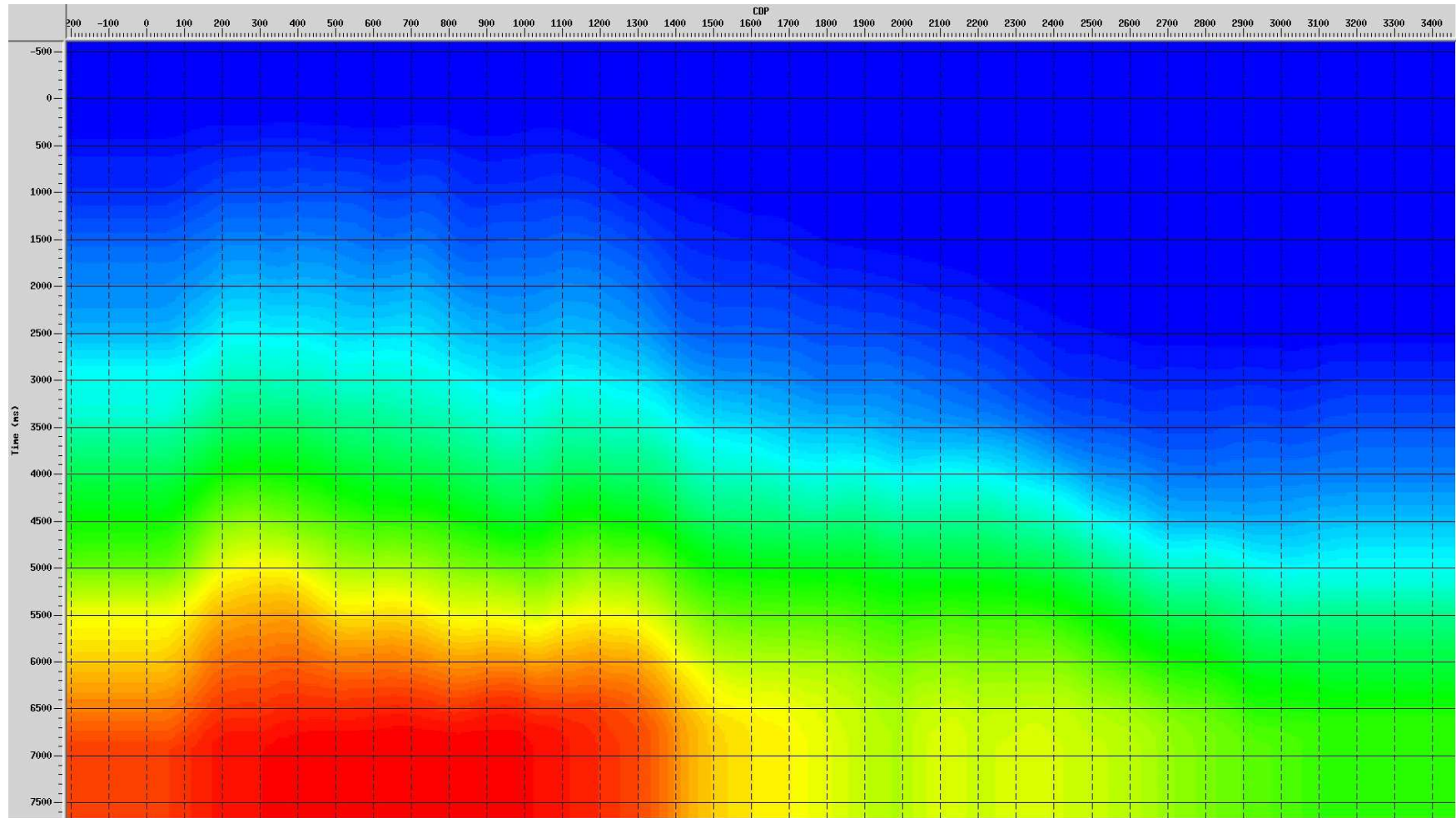


Figura 4.18: Modelo de velocidade suavizado obtido no PROMAX. A cor azul está relacionada às camadas com velocidades mais baixas (neste caso da camada d'água) e a cor vermelha às mais altas (neste caso das camadas sólidas mais profundas).

Com o modelo de velocidade estimado, o primeiro passo em direção ao empilhamento do dado é a correção NMO, e um efeito indesejado desta correção é o estiramento do pulso sísmico que é analisado através do teorema da mudança de escala na transformada de Fourier. Neste efeito, uma frequência f é modificada para uma frequência f' menor ($f > f'$), o que é quantificado por:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_{NMO}}{t(0)}. \quad (4.41)$$

Nesta equação, f é a frequência dominante, $\Delta f = f - f'$ um intervalo de frequência, e Δt_{NMO} é dado pela eq. (4.39), o que resulta em:

$$\frac{\Delta f}{f} = \left[1 + \left(\frac{x}{v_{NMO} t(0)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1. \quad (4.42)$$

Analisando a eq. (4.42) para um evento com frequência dominante f , velocidade NMO v_{NMO} e tempo duplo $t(0)$, se observa que uma variação no conteúdo de frequência aumenta com o afastamento x e com a diminuição de $t(0)$, logo este efeito é mais acentuado para eventos rasos e com longos afastamentos. Isto é prejudicial no empilhamento e é parcialmente solucionado com o silenciamento cirúrgico da zona de estiramento, que é um corte inclinado e abrupto a partir das coordenadas afastamento-tempo mínimo até as coordenadas afastamento-tempo máximo na família NMO-corrigida. Após o silenciamento, o empilhamento é efetuado em cada família CMP, que é resumida a um traço definido matematicamente por:

$$\bar{s}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \bar{u}_{i,t_i}; \quad (4.43)$$

onde \bar{s}_t é a amplitude resultante do empilhamento; \bar{u}_{i,t_i} é a amplitude no i -ésimo traço em tempo-duplo t_i ; e N é o número de traços a ser empilhado em cada família CMP (ver Figura 4.20). A Figura 4.21 mostra a seção empilhada NMO obtida, onde se observa características típicas de eventos de difração em D1 e das principais interfaces refletoras em P1, assim como o contorno do assoalho oceânico.

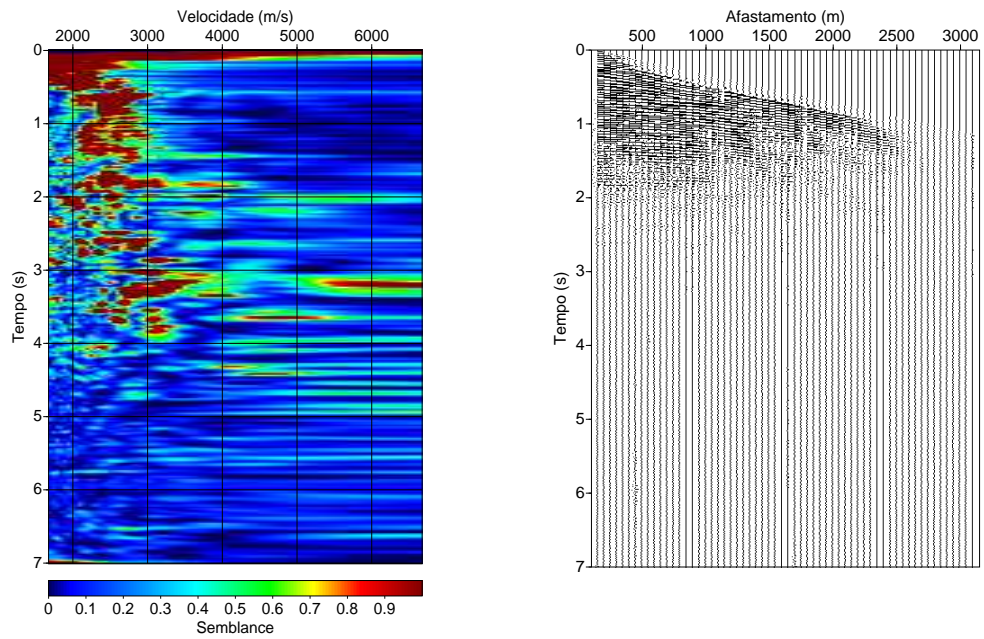


Figura 4.19: Mapa semblance e sua correspondente família CMP, respectivamente.

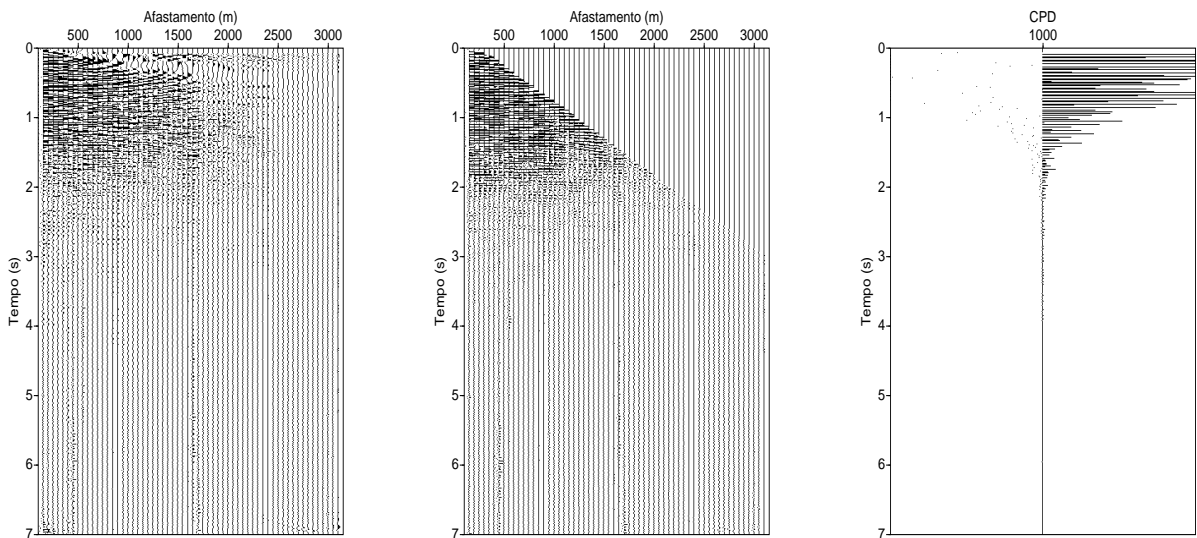


Figura 4.20: Família CMP após a correção NMO mostrando a horizontalização dos eventos de reflexão e o estiramento dos traços (1ª imagem). Efeito do estiramento parcialmente solucionado pelo corte cirúrgico (2ª imagem). Traço resultante do processo de empilhamento (3ª imagem).

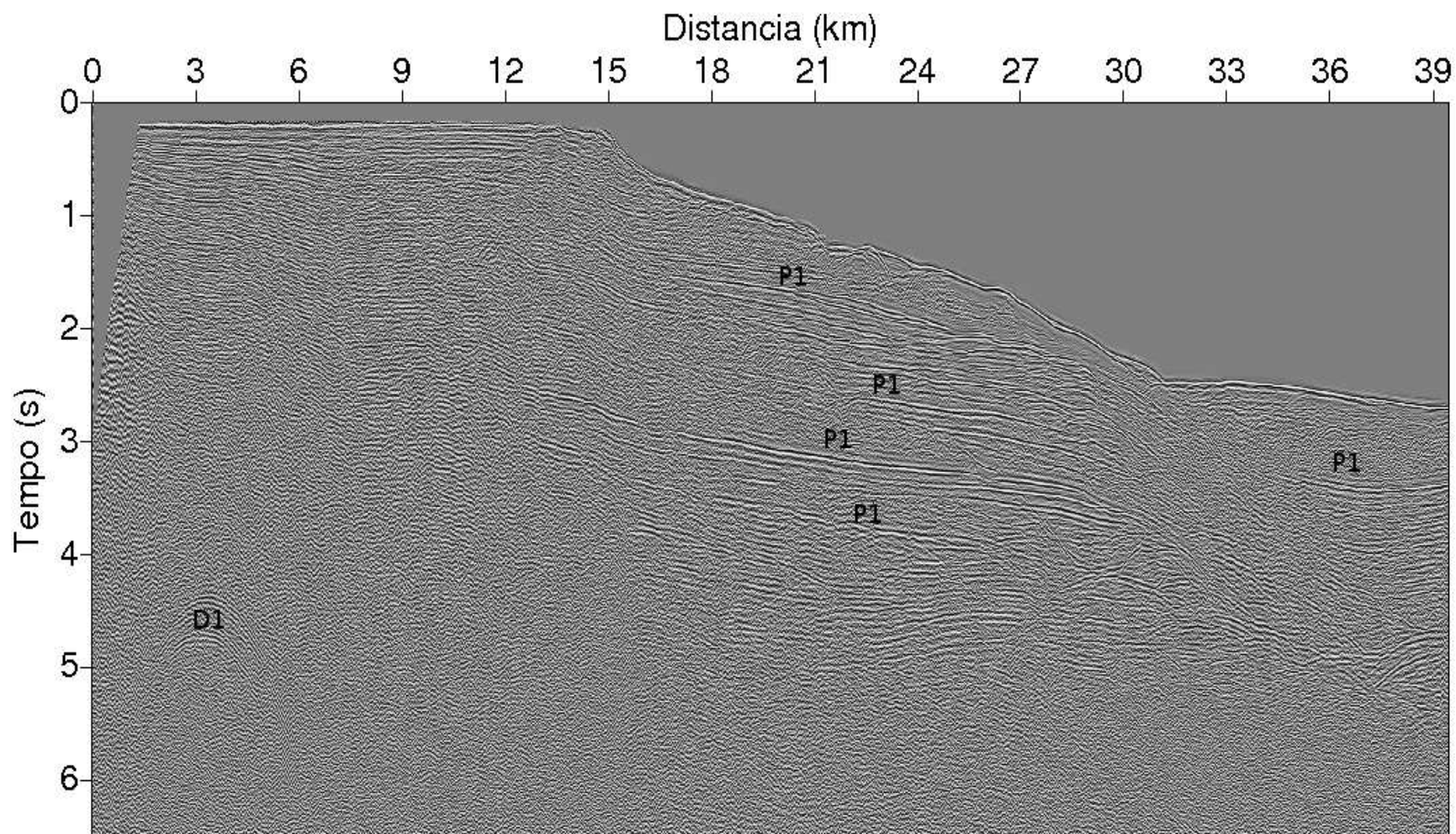


Figura 4.21: Seção empilhada NMO.

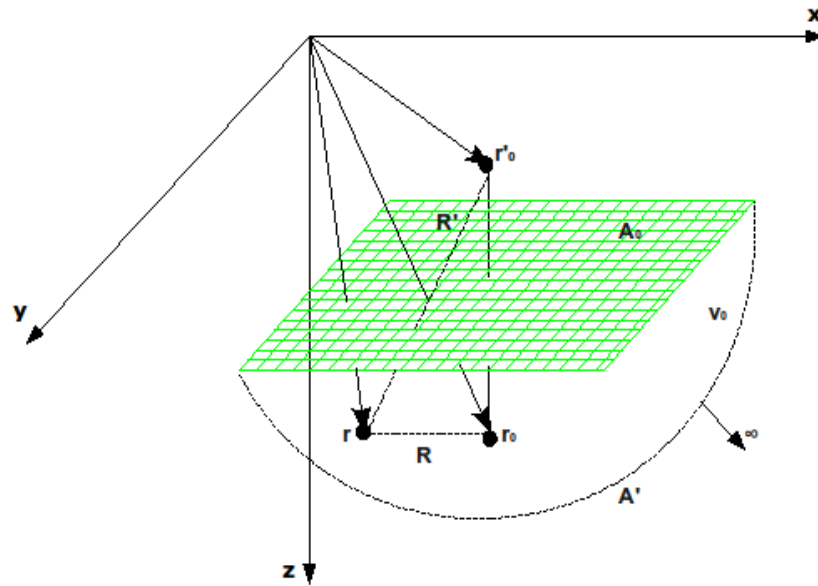


Figura 4.22: Meio escalar (3D) com volume V_0 delimitado pela fronteira $S_0 = A_0 + A'$, com um ponto fonte em \vec{r}_0 , sua imagem em \vec{r}'_0 e um ponto de observação em \vec{r} .

4.2.2 Princípio da Migração da Onda

O princípio de migração é analisado a partir da solução para a equação da onda escalar dada por:

$$\nabla^2 u(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -4\pi q(\vec{r}, t), \quad (4.44)$$

onde $u(\vec{r}, t)$ é um campo de onda e c a velocidade do meio. A solução completa para a eq. (4.44) num volume V_0 delimitado por uma fronteira S_0 vem da aplicação do Teorema de Green (SCHNEIDER, 1978), e é dada por

$$u(\vec{r}, t) = \int_{t_0} dt_0 \int_{S_0} dS_0 \left[G \frac{\partial}{\partial n} u(\vec{r}_0, t_0) - u(\vec{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial n} G \right], \quad (4.45)$$

onde $\vec{n} = n\hat{n}$ é um vetor normal a superfície S_0 , que inclui a superfície de aquisição A_0 e a superfície de forma semi-esférica A' que é extrapolada para o infinito de forma que suas contribuições sejam desprezíveis (ver Figura 4.22). Sendo assim, os valores na fronteira se reduzem a uma integral na superfície de aquisição, e à função de Green que consiste da resposta de uma fonte pontual em \vec{r}_0 e sua imagem em \vec{r}'_0 , dada por:

$$G(\vec{r}, t | \vec{r}_0, t_0) = \frac{\delta\left(t - t_0 \frac{R}{c}\right)}{R} - \frac{\delta\left(t - t_0 \frac{R'}{c}\right)}{R'}, \quad (4.46)$$

onde

$$R = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.47)$$

$$R' = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.48)$$

Na prática, o que é medido na fronteira é o campo $u(\vec{r}_0, t_0)$, o que requer que a função de Green se anule na fronteira ($G = 0$) como uma forma de eliminar o fator $\frac{\partial u(\vec{r}_0, t_0)}{\partial n}$, logo a eq. (4.45) é reescrita na forma:

$$u(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{t_0} dt_0 \int_{A_0} dA_0 \left\{ u(\vec{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial z_0} \left[\frac{\delta \left(t - t_0 - \frac{R}{c} \right)}{R} \right] \right\}, \quad (4.49)$$

que é a integral Kirchhoff. Trocando $\frac{\partial}{\partial z_0}$ por $\frac{\partial}{\partial z}$ e resolvendo a parte temporal da eq. (4.49), se obtém que:

$$u(\vec{r}, t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{A_0} dA_0 \frac{u \left(\vec{r}_0, t - \frac{R}{c} \right)}{R}. \quad (4.50)$$

Nesta representação fica claro que a eq. (4.45) é solução da equação da onda em virtude da forma $\frac{f(t - \frac{R}{c})}{R}$ do integrando.

Outra representação para a eq. (4.49) é na forma convolucional dada por

$$u(x, y, z, t) = u(x, y, z_0, t) * \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z_0} \left[\frac{\delta \left(t \pm \frac{r}{c} \right)}{r} \right], \quad (4.51)$$

que translada o campo de onda observado de um plano z para outro plano z' qualquer, e onde $r^2 = x^2 + y^2 + \Delta z^2$. Efetuando a transformada de Fourier de 4.51 nas variáveis x , y e t , pelo Teorema da Convolução, se escreve que:

$$\tilde{u}(k_x, k_y, z, \omega) = \tilde{u}(k_x, k_y, z_0, \omega) H(k_x, k_y, z_0, \omega), \quad (4.52)$$

sendo H a função transferência dada por:

$$H = e^{\pm i|\Delta z|} \left[\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_x^2 - k_y^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.53)$$

que permite continuar o campo de onda no domínio do espaço, sendo a direção de continuação definida com a escolha do sinal nas eqs. (4.51) e (4.52) (SCHNEIDER, 1978). A Figura 4.23 mostra uma onda esférica irradiada a partir de um ponto fonte p e duas interfaces de observação z_1 e z_2 . O campo de onda em z_2 é obtido a partir do campo de onda em z_1 pelo

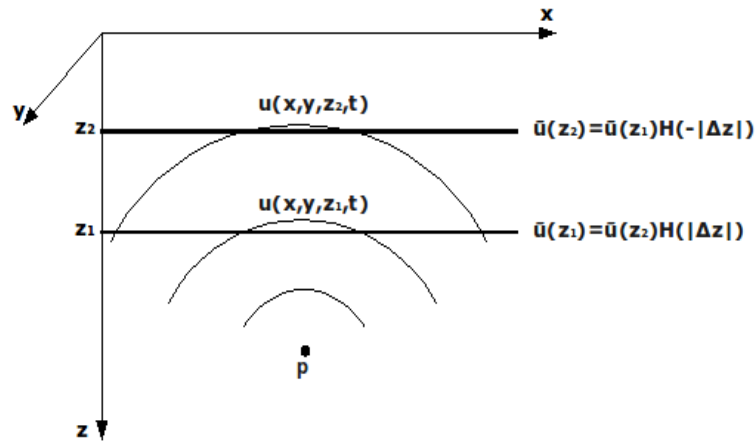


Figura 4.23: Esquemática de como a função transferência H promove a translação do campo de um plano z para outro.

uso da eq. (4.52) com sinal negativo na função transferência H , assim como o campo em z_1 é obtido a partir do campo em z_2 agora com H com sinal positivo. Para a migração o campo deve ser extrapolado em direção de seu ponto de origem, logo o sinal usado na função transferência usada neste processo é positivo.

A idéia básica da migração é que o campo de onda $u(x, y, z = 0, t)$ registrado na superfície representa o valor de fronteira do campo de onda $u(x, y, z, t)$ se propagando ascendentemente a partir de um refletor numa certa profundidade. A determinação de $u(x, y, z, t)$ a partir de $u(x, y, z = 0, t)$ é efetuada através da continuação do campo até o tempo de acionamento das fontes, que corresponde, computacionalmente, ao deslocamento dos sensores localizados na superfície para maiores profundidades (ROBINSON; SILVIA, 1981). Esta continuação é a primeira etapa do processo de migração, e a segunda é o imageamento feito através da condição de imageamento definida por:

$$M(x, y, z) = u(x, y, z, t_I(x, y, z)), \quad (4.54)$$

sendo $M(x, y, z)$ a seção migrada e $t_I(x, y, z)$ o tempo no qual o campo de onda ascendente deixa o ponto (x, y, z) na subsuperfície. Se existir um refletor neste ponto sua profundidade e propriedades de forma e reflexão serão fixados em $M(x, y, z)$, no caso da ausência de refletor o valor fixado é nulo. O tempo de imageamento depende do tipo de seção avaliada, e no caso de afastamento nulo (empilhada) este tempo é:

$$t_I(x, y, z) = 0. \quad (4.55)$$

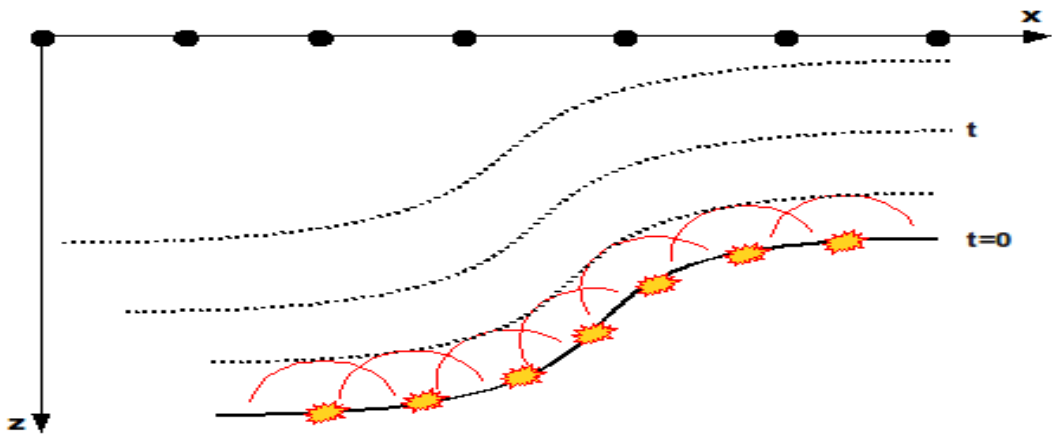


Figura 4.24: Representação do modelo (2D) *refletor em explosão*. As fontes estão localizadas nas interfaces refletoras, e são acionadas simultaneamente. O campo produzido se propaga de acordo com o Princípio de Huygens até a superfície de aquisição $z = 0$.

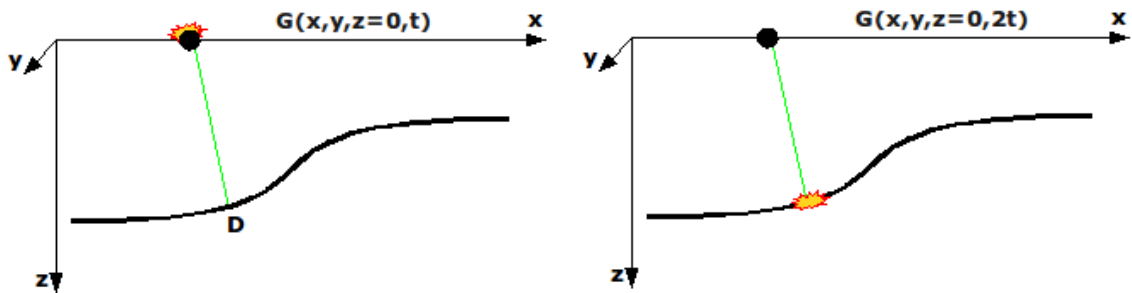


Figura 4.25: A esquerda o modelo afastamento-nulo e a direita o modelo refletor explosivo. Na primeira imagem o campo de onda parte a superfície no instante $t = 0$, reflete em D e retorna a superfície onde é registrada no tempo t . Na segunda imagem se tem outra forma de representar o afastamento-nulo, onde o campo de onda parte um ponto da subsuperfície no tempo $t = 0$ e é registrado na superfície no tempo $2t$. Outra forma de relacionar estes modelos é que a velocidade do campo de onda no segundo modelo é a metade da velocidade no primeiro.

Uma forma de representar uma seção empilhada é através de um experimento físico denominado refletor explosivo, onde os receptores são localizados numa superfície de aquisição e as fontes ao longo das interfaces refletoras onde são acionadas simultaneamente, o campo produzido se propaga até a superfície de aquisição segundo o Princípio de Huygens (ver Figura 4.24). Com este modelo, as equações ao longo desta seção devem ter suas velocidades modificadas pela multiplicação do fator $1/2$, e o resultado é a velocidade de migração (ver Figura 4.25).

Dada uma seção empilhada pode-se continuar o dado registrado $u(x, y, z = 0, t)$ para

profundidades maiores, o que é representado pela equação:

$$u(x, y, z, t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{A_0} dA_0 \frac{u\left(x, y, z = 0, t + \frac{R}{c}\right)}{R}. \quad (4.56)$$

Se o objetivo é mapear valores proporcionais às refletividades, se deve calcular a eq. (4.56) para os pontos em subsuperfície no tempo $t = 0$ de acionamento das fontes fixando $t = 0$ e calculando a integral para toda área de interesse (x, y, z) , ou seja:

$$u(x, y, z, t = 0) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{x_0} \int_{y_0} dx_0 dy_0 \frac{u\left(x, y, z = 0, \frac{z}{c}\right)}{R}. \quad (4.57)$$

Este processo é denominado de migração pós-empilhamento baseado na integral Kirchhoff, ou simplesmente Migração Kirchhoff. A eq. (4.57) é a seção migrada representada por 4.54 conhecida como princípio da imagem que mapea o campo no domínio (x, y, z, t) para o domínio (x, y, z) , e que pode ser mapeado para o domínio $(x, y, z, \frac{z}{c})$ correspondente à sub-superfície. A Figura 4.26 ilustra a relação entre o dado de entrada e de saída no mapeamento. A entrada é um traço empilhado registrado no plano $z = 0$ e a saída é um traço em alguma posição (x, y) plotado versus z e o tempo z/c . Como os refletores se movem para baixo através de sucessivas posições mapea-se um ponto em cada uma destas etapas e calcula-se para este ponto a integral para o tempo $t = 0$. Por exemplo, o receptor r_1 em z_1 mapea um valor nulo para $t = 0$ devido o receptor não estar no ponto de reflexão, da mesma forma o valor se anula também para o receptor r_2 em z_2 . O valor desta integral não será nulo quando o receptor estiver muito próximo ou em cima do refletor, como ocorre em z_3 , quando isto ocorre um valor não-nulo é relacionado a este ponto na subsuperfície, este mapeamento é a ultima etapa do processo de migração e produzirá uma imagem migrada.

Assim, segundo o modelo refletor explosivo e a migração, a eq. (4.57) é entendida como o processo que permite conhecer o valor do campo no tempo $t = 0$ a partir de seus valores registrados pelos receptores no tempo t . Ou ainda, um processo de continuação do campo $u(\vec{r}_0, t_0)$, conhecido na fronteira A_0 , para $u(\vec{r}, t = 0)$ em um ponto em subsuperfície.

Neste trabalho a migração Kirchhoff foi feita usando o modelo de velocidade obtido durante a análise de velocidade semblance. Analisando esta seção (ver Figura 4.27) se percebe que as estruturas de sub-superfície pouco se deslocaram em comparação à seção empilhada mostrada na Figura 4.21. Uma das vantagens da análise desta seção migradas é que se pode indentificar estruturas pouco percebidas na seção empilhada e na afastamento-mínimo, assim como se pode perceber melhor continuidade nas interfaces refletoras, com destaque para a continuidade no refletor indicada por P2', P2'' e P2''''. Anterior a migração Kirchhoff foram

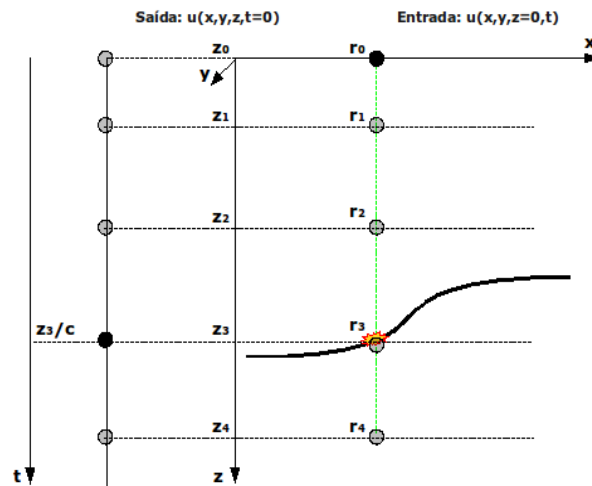


Figura 4.26: Relação entre o dado de entrada $u(x, y, z = 0, t)$ e o de saída $u(x, y, z, t = 0)$ no mapeamento do campo de onda em (x, y, z, t) para $(x, y, z, \frac{z}{c})$.

efetuados testes utilizando a migração Stolt com velocidade constante com o objetivo de perceber a velocidade que colapsaria a difração D1 (ver Figura 4.21). Um dos resultados deste testes se encontra na Figura 4.28, onde se nota o capso de difração e a continuidade já notada na Figura 4.27, agora indicada por P3. Durante estes testes também não se notou deslocamento consideráveis das estruturas de subsuperfície.

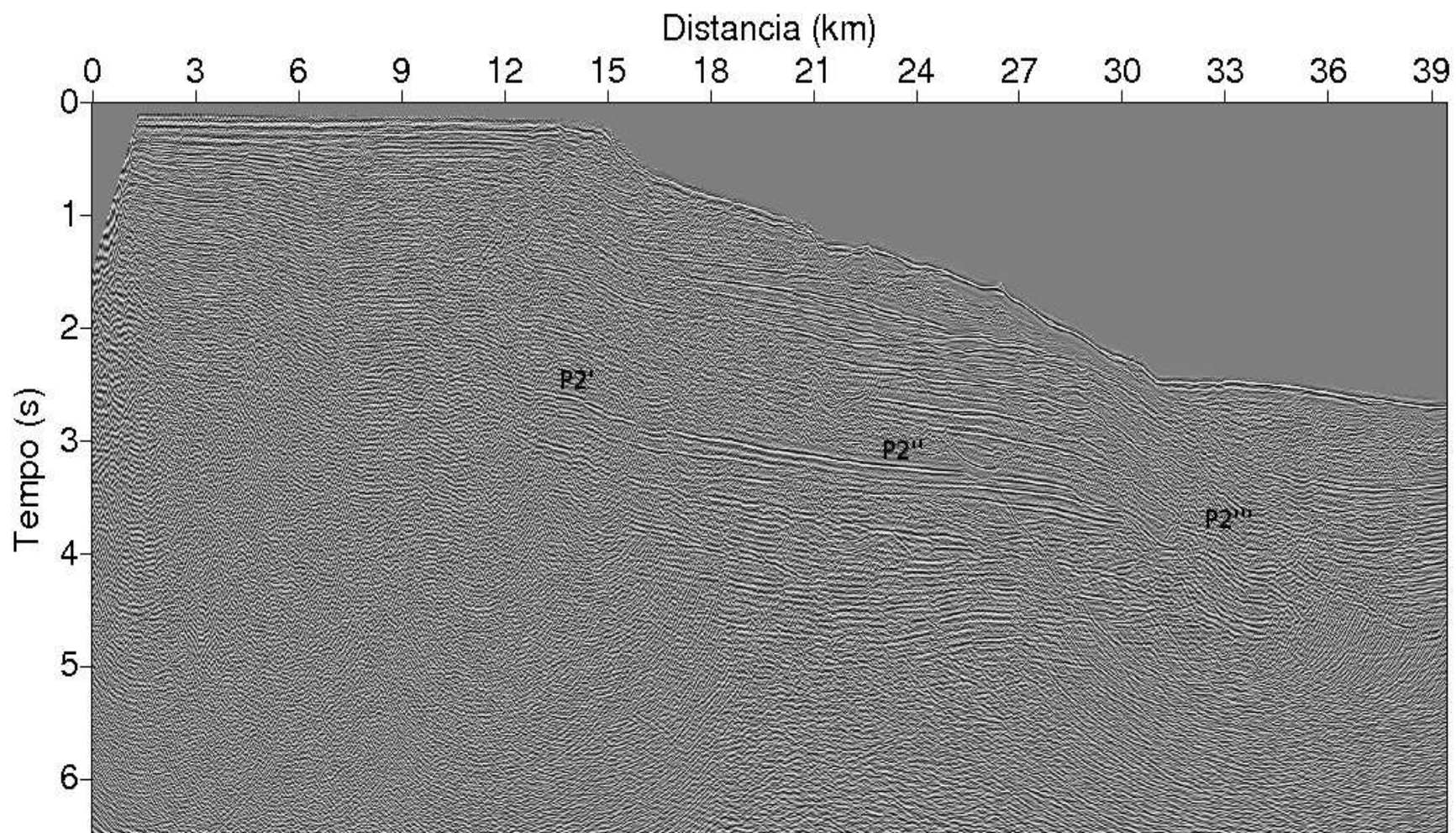


Figura 4.27: Seção migrada Kirchhoff.

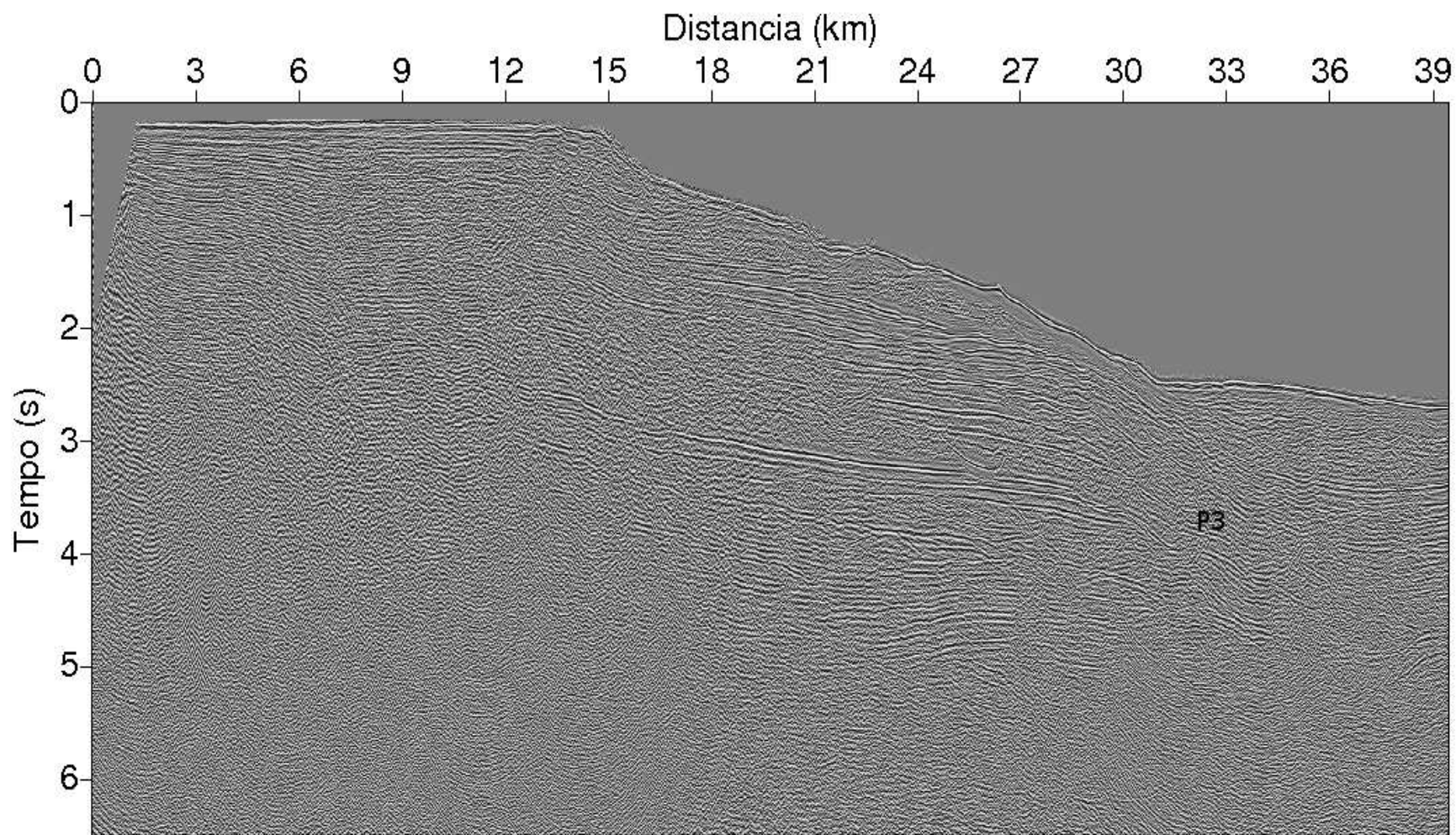


Figura 4.28: Seção migrada Stolt.

5 PROCESSAMENTO NÃO-CONVENCIONAL

Os métodos não-convencionais são aqui referidos à tecnologia CRS para a simulação de seção AN e obtenção de sub-produtos. Este método tem como característica principal ser considerado como independente do modelo de velocidade, automático e recuperar os atributos da frente de onda. Este capítulo é dedicado ao CRS e à apresentação dos principais resultados obtidos via esta metodologia.

5.1 EMPILHAMENTO CRS

5.1.1 Atributos da Frente de Onda

O operador de empilhamento CRS é obtido com base na teoria paraxial do raio, onde se faz uso do conceito das ondas hipotéticas NIP e N que se propagam ascendentemente a partir do refletor. A superfície de observação é considerada plana, que é uma boa aproximação para dados adquiridos em mar. A onda-NIP se propaga a partir de um ponto localizado no refletor e a onda-N a partir da explosão de um seguimento da superfície do refletor ao redor do ponto NIP e com curvatura inicial igual à curvatura local do refletor. Estas ondas são representadas em relação ao raio central, que simula o experimento AN, no seu ponto de emergência $P_0(x_0, t_0)$, e elas são associadas a 3 atributos cinemáticos que descrevem o operador de empilhamento, que são: (1) o ângulo de emergência β_0 ; (2) o raio de curvatura R_N relacionado a onda-N; e (3) o raio de curvatura R_{NIP} relacionado a onda-NIP. As curvaturas correspondentes são: $K_N = \frac{1}{R_N}$ para a onda-N; e $K_{NIP} = \frac{1}{R_{NIP}}$ para a onda-NIP (ver Figura 5.1). Além do empilhamento CRS outras aplicações são possíveis para estes atributos de empilhamento e se pode citar (DUVENECK, 2002) e (BAYKULOV, 2008) como exemplos.

Na modelagem, os atributos da frente de onda podem ser propagados através das leis da refração e reflexão obedecendo a lei de Snellius. O raio de curvatura é propagado segundo a lei:

$$R_{i+1} = R_i + v_i \Delta t_i; \quad (5.1)$$

onde R_{i+1} é o raio de curvatura na camada $i + 1$, R_i é o raio de curvatura na camada anterior i e $v_i \Delta t_i$ é o seguimento reto que une os dois pontos. A curvatura da frente de onda para

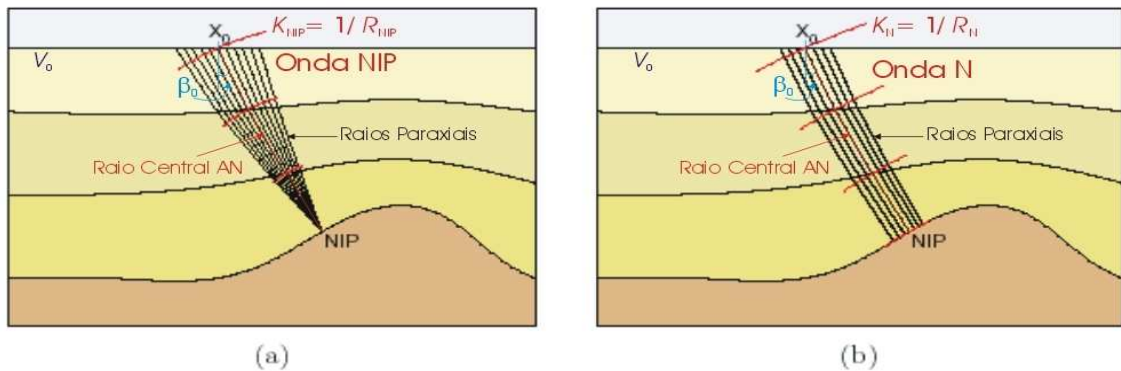


Figura 5.1: Modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano-horizonta com desenho dos atributos da frente de onda. β_0 é o ângulo de emergência da onda hipotética de raio central referente ao experimento AN. (a) Onda-NIP com origem num ponto NIP de raio de curvatura R_{NIP} e curvatura K_{NIP} . (b) Onda-N com origem num seguimento do refletor de raio de curvatura R_N e curvatura K_N .

ondas transmitidas no meio segue a lei:

$$\frac{1}{R_{i+1}} = \frac{v_{i+1}}{v_i} \frac{\cos^2 \alpha_i}{\cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_i} + \frac{1}{\cos^2 \beta_i} \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \cos \alpha_i - \cos \beta_i \right) \frac{1}{R_{i,F}}. \quad (5.2)$$

E para ondas refletidas a lei é dada por:

$$\frac{1}{R_{i+1}} = \frac{1}{R_i} + \frac{2}{\cos^2 \beta_i} \frac{1}{R_{i,F}}; \quad (5.3)$$

onde α_i é o ângulo de incidência do raio na camada i , β_i o ângulo de transmissão do raio para a camada $i + 1$ e $R_{i,F}$ é o raio de curvatura relacionado da interface i (HUBRAL; KREY, 1980). Com as eqs. (5.2) e (5.3) se pode calcular os raios de curvatura das ondas NIP e N, sabendo que a partir de uma posição inicial sobre um ponto do refletor se tem:

$$\begin{aligned} R_i^{NIP} &= 0; \\ R_i^N &= R_{i,F}; \end{aligned} \quad (5.4)$$

onde o raio de curvatura R_{NIP} é nulo e o raio R_N é igual ao raio de curvatura ao redor do ponto onde estas ondas são originadas. Esta condição é imediata da definição das ondas hipotéticas N e NIP (ver Figura 5.1).

5.1.2 Superfície de Empilhamento CRS

O tempo de trânsito para reflexões primárias relativas à vizinhança do raio central normal é dada pela equação hiperbólica na forma:

$$t_{hip}^2(x_m, h) = \left[t(0) + 2 \frac{\sin \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + 2t(0) \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]. \quad (5.5)$$

Nesta equação, v_0 é a velocidade da camada próxima ao ponto P_0 , $t(0)$ é o tempo-duplo de um raio que simula um raio normal, x_m é o ponto-médio entre fonte e receptor com meio-afastamento h e x_0 é a coordenada espacial referente ao ponto de emergência do raio central (MANN, 2002) (MANN et al., 2003). O empilhamento com este operador é independente do modelo de velocidade, e os atributos (R_{NIP} , R_N , β_0) são os parâmetros que definem a superfície de empilhamento referente ao tempo-duplo (MÜLLER, 1999).

Este trio de atributos é obtido através da solução de um problema de otimização global não-linear, tendo como função objeto de minimização a função semblance. A busca é feita em intervalos de vínculos explícitos na forma: $-\frac{\pi}{2} < \beta_0 < \frac{\pi}{2}$ e $-\infty < R_{NIP}, R_N < +\infty$, e para a otimização simultânea dos parâmetros se define um trio inicial de referência (β_0^{ini} , R_{NIP}^{ini} , R_N^{ini}) através de três processos individuais de busca paramétricas mostradas no Apêndice A, e esta otimização é efetuada pelo algoritmo do poliedro flexível simplex (MANN, 2002). A Figura 5.2 ilustra a superfície do dado registrado e do operador CRS a serem ajustadas.

5.2 O EMPILHAMENTO CRS-PARCIAL

O empilhamento CRS-parcial consta da interpolação de famílias CMP ao cubo de dados com o objetivo de densificar a malha, previamente ao empilhamento CRS, sob a condição de super-famílias. Esta superfície é calculada para cada ponto $A(t_A, h_A)$ através do tempo-duplo $t(0)$ do ponto considerado e seus correspondentes parâmetros CRS obtidos através da busca individual paramétrica já mencionada. O tamanho dessa superfície de empilhamento deve ser menor do que a superfície de empilhamento CRS, e é estabelecida pelas aberturas de empilhamento CRS-parcial (ver Figura 5.3). A aplicação deste processo neste trabalho se deu com o objetivo de melhorar a qualidade do dado pelo aumento da razão sinal/ruído (ver Figura 5.4), e gerou uma seções de melhor qualidade visual.

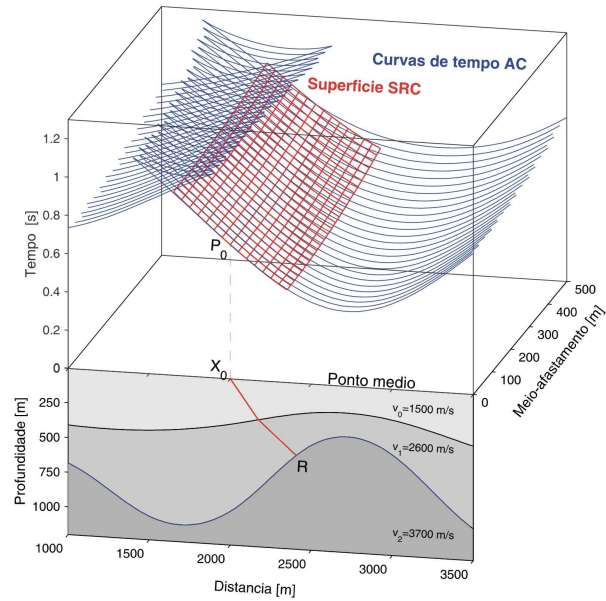


Figura 5.2: Parte inferior: Modelo composto (3D) por duas camadas sobre um semi-espço. O raio em N tem cor vermelha. Parte superior: Superfície de cobertura múltipla, em azul, correspondente às reflexões da segunda interface. Em vermelho, a superfície de empilhamento CRS correspondente ao ponto de reflexão R calculada através da aproximação hiperbólica 5.5.

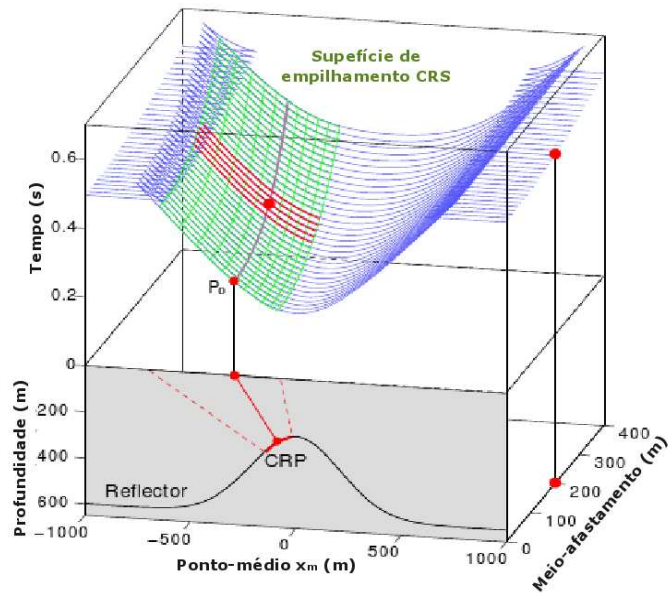


Figura 5.3: Superfície do operador CRS parcial (em vermelho) ao longo da qual se empilha as amplitudes em torno de um ponto $A(t_A, h_A)$ especificado na curva temporal relacionada a um CMP (curva roxa), e atribuindo o resultado a este mesmo ponto para gerar uma super-família CRS. A curva de empilhamento CRS parcial coincide localmente com a curva de empilhamento CRS (em verde).

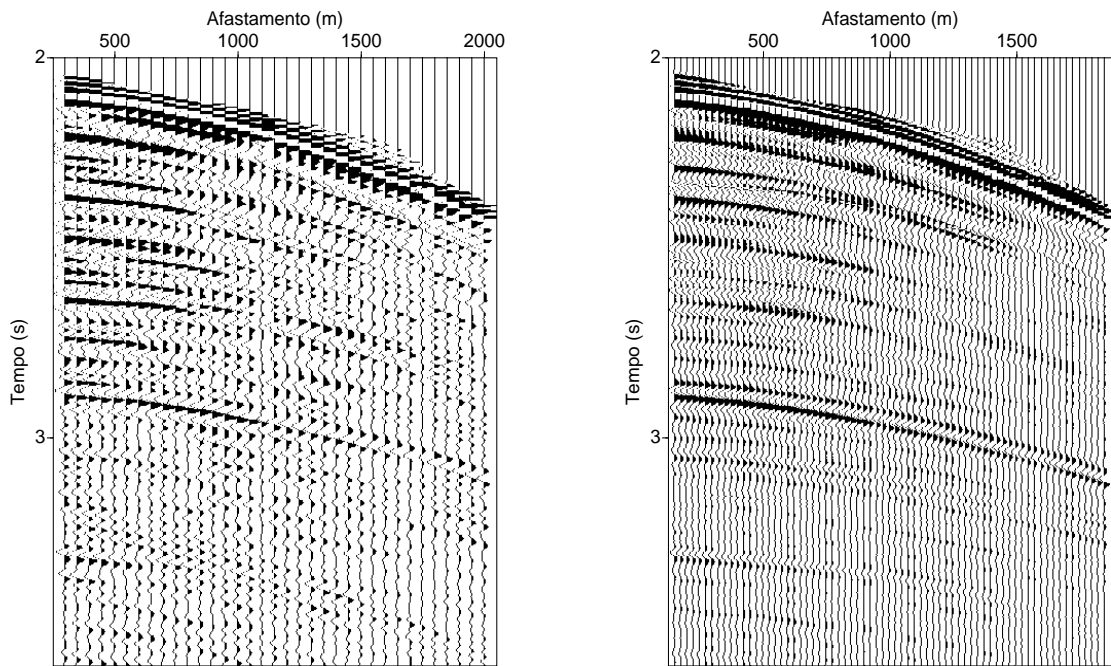


Figura 5.4: Família CMP número 2900 (esquerda). Super-família CMP número 2900 (direita). Visualização na janela temporal de 2,0 – 4,0s. Devido à densificação do dado observa-se uma melhora para identificação dos eventos de reflexão. Não foi aplicado ganho a estas imagens.

O cálculo do tempo-duplo para este processo é baseado na eq. (5.5) para $x_m = x_0$, e é dada por:

$$t_{hip}^2(h) = t'^2(0) + 2 \frac{t'(0)h^2}{v_0 R_{NIP}} \cos^2 \beta_0, \quad (5.6)$$

onde $t'(0)$ são os tempos testados, e β_0 e R_{NIP} são os parâmetros correspondentes de forma a melhor ajustar a superfície de empilhamento (BAYKULOV, 2008). A eq. (5.6) não ajusta exatamente ao ponto $A(t_A, h_A)$, já que somente valores discretos de tempos são testados. Para a retificação deste desajuste se começa por fixar os parâmetros presentes na eq. (5.6), já que variam suavemente ao redor do ponto especificado, e se defini o tempo de trânsito t_A relacionado ao meio-afastamento h_A na forma:

$$t_{A\ hip}^2 = t^2(0) + 2 \frac{t(0)h_A^2}{v_0 R_{NIP}} \cos^2 \beta_0, \quad (5.7)$$

onde $t(0)$ é o tempo-duplo que ajusta exatamente $A(t_A, h_A)$. Resolvendo esta equação quadrática

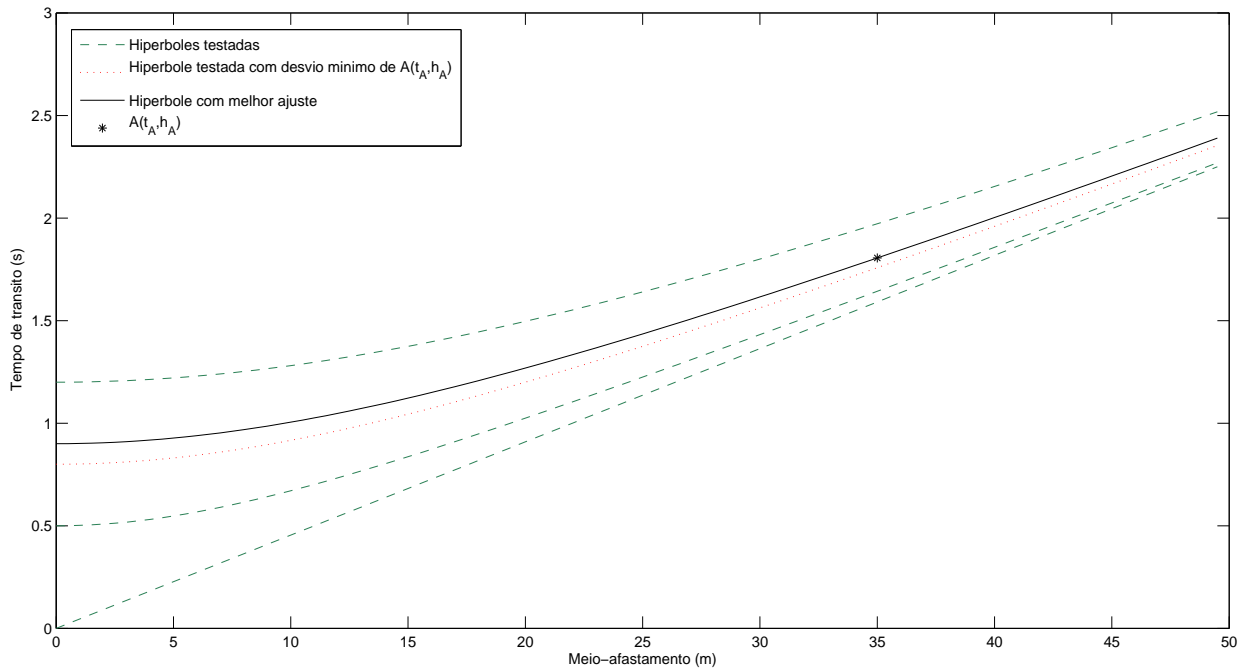


Figura 5.5: Representação gráfica dos testes efetuados durante o empilhamento CRS parcial. A hipérbole testada com desvio mínimo está relacionada à eq. (5.6) e a hipérbole que melhor se ajusta ao evento $A(t_A, h_A)$ está relacionada à eq. (5.7) com tempo-duplo dado pela eq. (5.8).

em $t(0)$, se obtém:

$$t(0) = -\frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \sqrt{\left(\frac{h_A^2 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}}\right)^2 + t_{A \text{ hip}}^2}. \quad (5.8)$$

A eq. (5.8) fornece o tempo-duplo usado na eq. (5.6) que define o operador de empilhamento CRS-parcial, e é usada para o empilhamento coerente do dado para a construção das super-famílias (ver Figura 5.5).

5.3 FLUXOGRAMA E RESULTADOS

Os aplicativos utilizados no processamento CRS apresentam parâmetros que podem ou não ser definidos pelo usuário, aqui se optou por usar parte destes valores definidos automaticamente na estrutura do algoritmo, e uma breve descrição desses parâmetros, independente se foram ou não definidos pelo usuário, se encontra nos apêndices B e C.

O trabalho de Lima (2010) mostra de forma prática como o processo de densificação do dado aumenta a qualidade visual das seções geradas, assim se optou pelo uso do empilhamento

CRS-parcial com o intuito de melhorar os resultados obtidos. Este processo se mostrou de fundamental importância no processamento de linhas com baixa qualidade, como é o caso da linha processada neste trabalho, adquirida em 1985.

O dado de entrada para o empilhamento CRS foi a saída da primeira etapa do processamento NMO na configuração CMP. A primeira parte deste processamento é voltada à busca tri-paramétrica (β_0 , R_{NIP} , R_N) seguindo o fluxo do algoritmo do programa *crsstack_511* (ver Apêndice B) necessário para o empilhamento CRS-parcial (*crsstack_supergathers* - ver Apêndice C). A entrada para o empilhamento CRS-parcial constou das famílias CMPs e dos atributos β_0^{ini} , R_{NIP}^{ini} e R_N^{ini} iniciais obtidos. As super-famílias geradas são a entrada para o processo completo do empilhamento CRS gerando as seções otimizadas (ver Fluxograma 5.1). Os parâmetros de controle definidos para isto estão na Tabela 5.2, onde alguns foram escolhidos de acordo com o conhecimento que se tem a respeito do dado, como a frequência dominante *wavefr*, alguns por testes, como as aberturas para o empilhamento AN *minxap* e *maxxap*, e outros devido à sugestões de pesquisadores mais experientes com o CRS, como os definidos para a situação de mergulhos conflitantes. Este processo gerou seções Coerência (ver Figura 5.6), Ângulo de Emergência (ver Figura 5.7), Raio de Curvatura R_N (ver Figura 5.8), Raio de Curvatura R_{NIP} (ver Figura 5.9), Seção Empilhada (ver Figura 5.10) e seção CRS-migrada (ver Figura 5.11), sendo as seções empilhada e migrada relacionadas à Primeira Zona de Fresnel Projetada.

A importância da seção coerência está no fato de que o empilhamento CRS tem o Semblance como medida para o realce dos eventos mais coerentes relacionados ao operador 5.5. As múltiplas, eventos considerados indesejáveis, são também destacados por apresentar alta coerência nesta seção, sendo tão realçados quando alguns eventos primários, o que faz com que o processo de tratamento de múltiplas seja de extrema importância no dado que será empilhado via metodologia CRS.

Na Figura 5.7 é mostrada a seção ângulo de emergência β_0 , que varia aproximadamente entre -35 e 20 graus, e a importância da análise desta seção está no fato de que o ângulo de emergência está fortemente relacionado com a inclinação das superfícies refletoras.

A curvatura R_N é visualizada na Figura 5.8, a análise desta seção está relacionada à curvatura das interfaces refletoras pela relação $K_N = \frac{1}{R_N}$, onde os sinais positivo e negativo estão relacionados à concavidade do seguimento da interface refletora. A seção R_{NIP} , mostrada na Figura 5.9, informa o aumento temporal sistemático para R_{NIP} , uma vez que ele está relacionado à distância entre o ponto de observação e o ponto de reflexão em profundidade.

A seção empilhada CRS (ver Figura 5.10) apresenta melhor qualidade visual do que a

NMO no sentido de realçar mais os eventos refletoras, mostrando melhor continuidade destas estruturas e maior razão sinal/ruído, como na região indicada por P4 por exemplo. A Figura 5.11 mostra a seção migrada sub-produto do processo completo do CRS. Esta migração foi capaz de implementar boa continuidade e suavidade nas superfícies refletoras com destaque para as regiões indicadas por P5 e P5', esta seção foi a que apresentou maior qualidade visual para uma interpretação geométrica dos principais eventos observados.

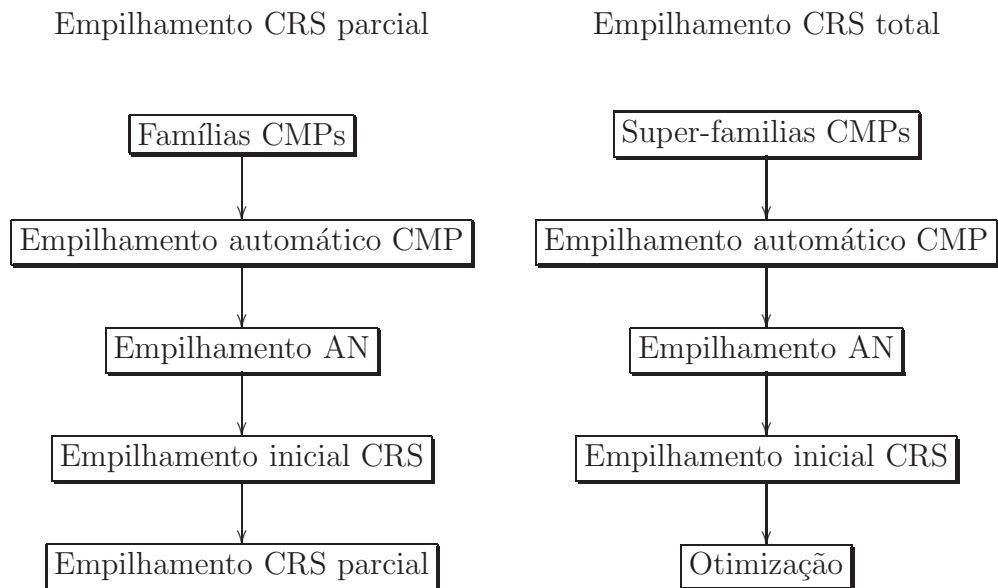


Tabela 5.1: Fluxograma do empilhamento CRS da linha *L2140270* tendo como dado de entrada a saída da primeira etapa do processamento NMO.

Tabela 5.2: Parâmetros definidos para o empilhamento CRS e para a densificação do dado.

Parâmetros Gerais	Valores
Medida de coerência	Semblance
Dado usado para análise de coerência	Traços normalizados
Frequência dominante	30 Hz
Velocidades	Valores
Velocidade próxima ao ponto de emergência	1500 m/s
Velocidades de empilhamento	1500 à 6000 m/s
Aberturas e suavização	Valores
Mínima abertura ZO	50 em 0.02 s
Máxima abertura ZO	500 em 3.5 s
Mínima abertura CMP	150 em 0.02 s
Máxima abertura CMP	3000 em 3.5 s
Buscas de β_0	Valores
Menor β_0 a ser simulado	-65°
Maior β_0 a ser simulado	65°
Deteção de mergulhos conflitantes	Valores
Número máximo de mergulhos conflitantes	1
Mínimo de coerência para um máximo global	0.4
Mínimo de coerência para um máximo local	0.3
Busca final	Valores
Limite de coerência para tempos de trânsito pequenos	0.03
Limite de coerência para tempos de trânsito grandes	0.06
Número de iterações na otimização	100
Variação inicial dos ângulos de emergência	6°
Variação inicial de R_{NIP}	5%
Variação inicial de R_N transformado	6%
Raio de transformação de R_N	100 m
Densificação do dado	Valores
Intervalo entre receptores nas super-famílias geradas	25 m

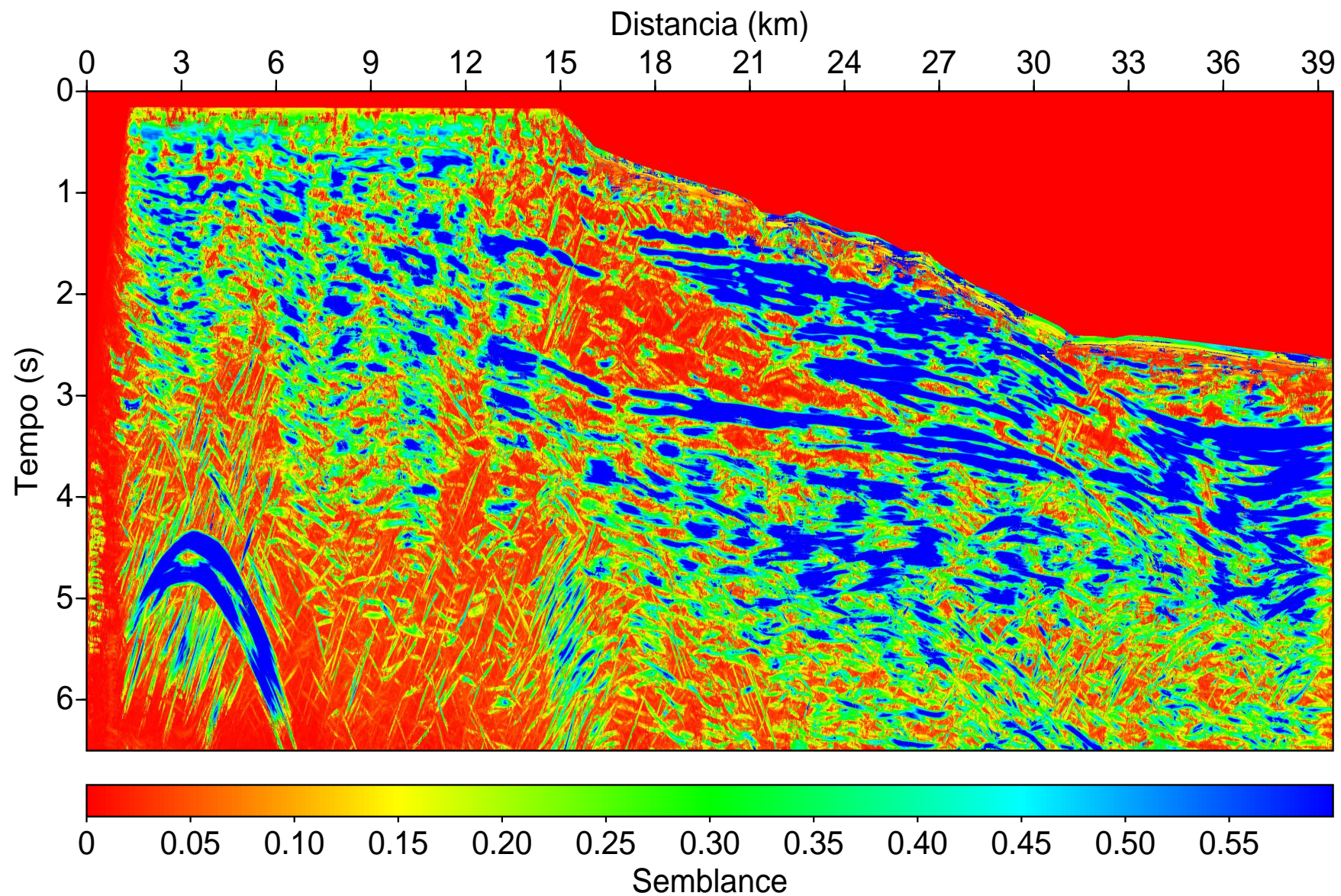


Figura 5.6: Seção coerência do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.

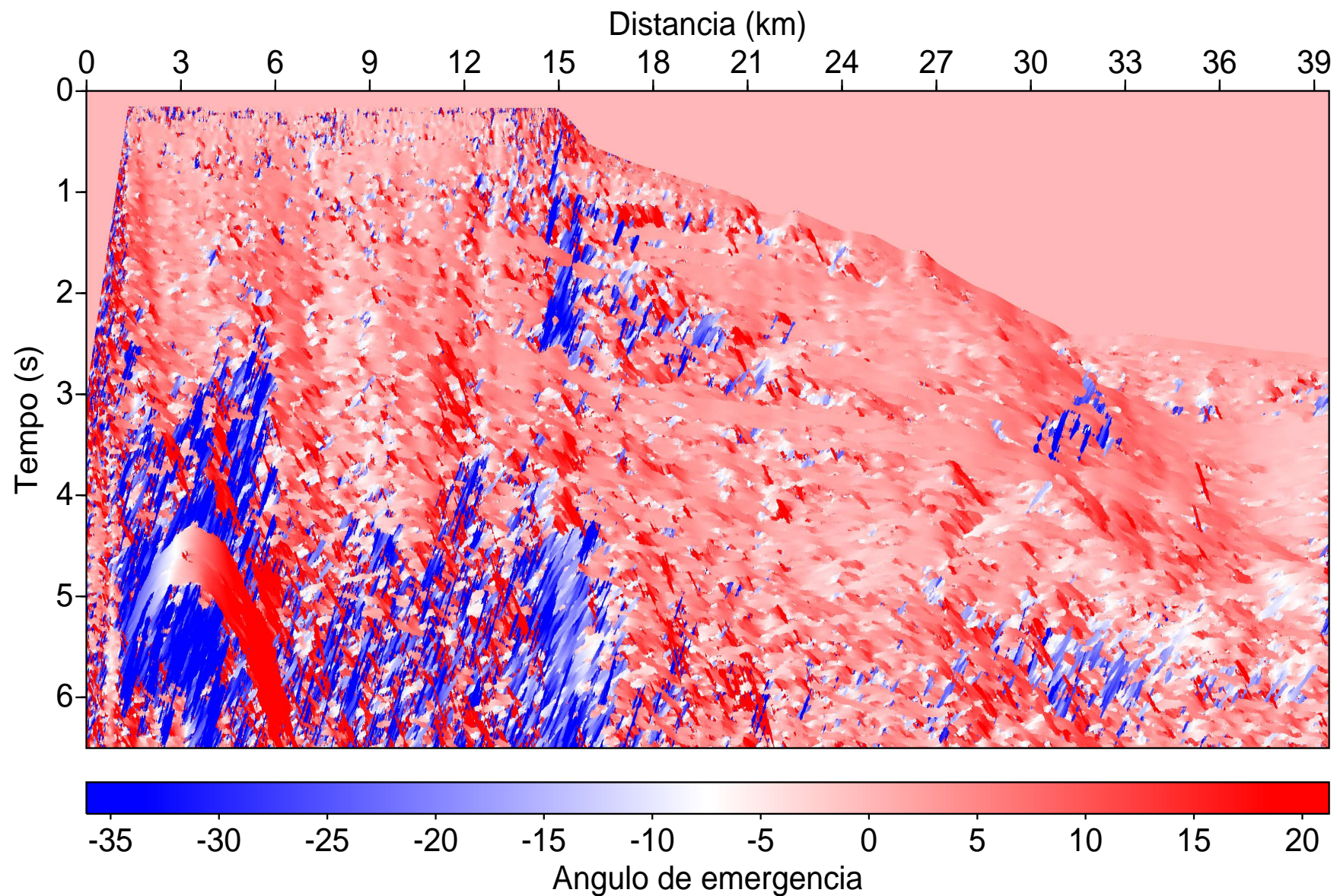


Figura 5.7: Seção ângulo de emergência β_0 do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.

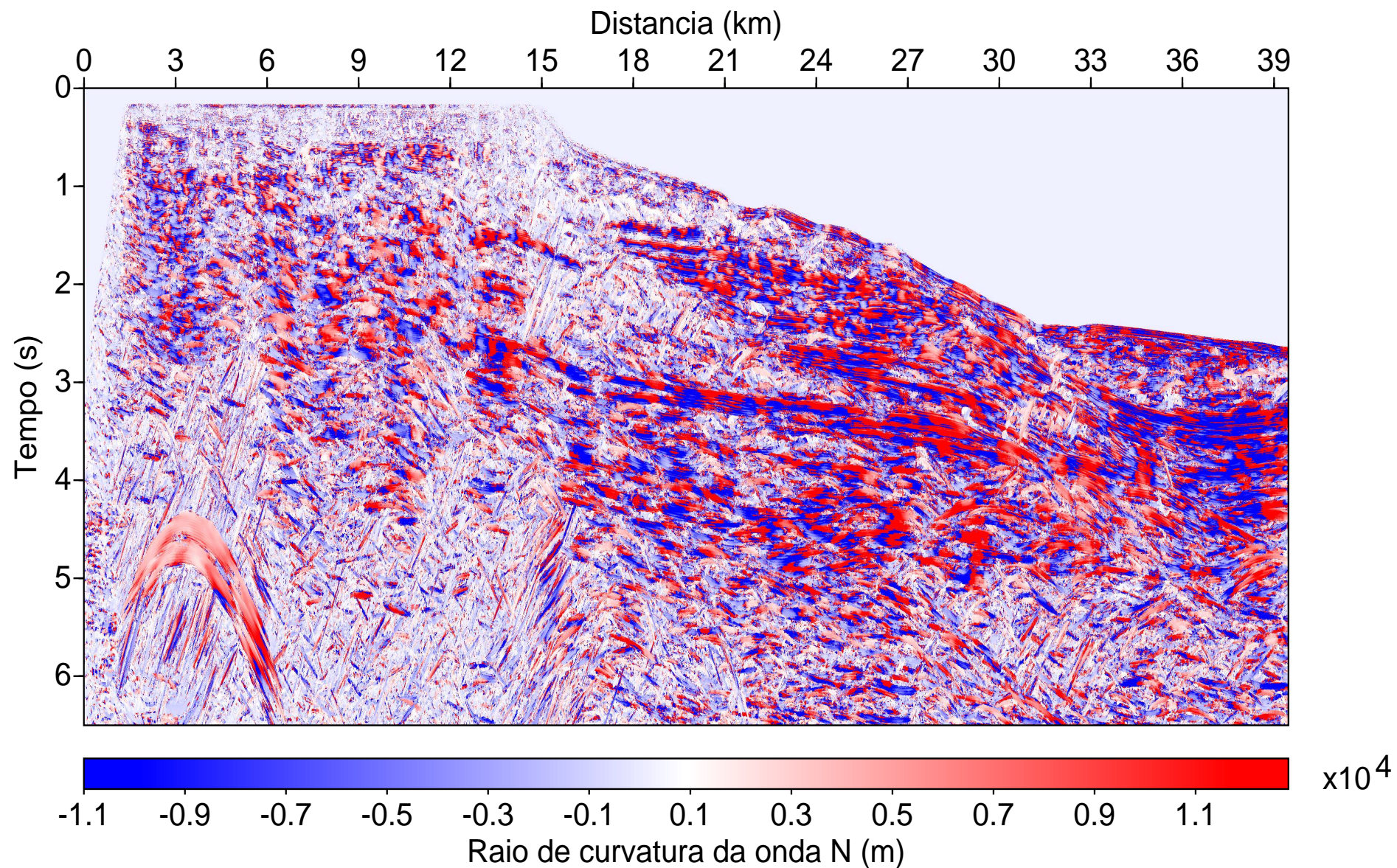


Figura 5.8: Seção raio de curvatura R_N do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.

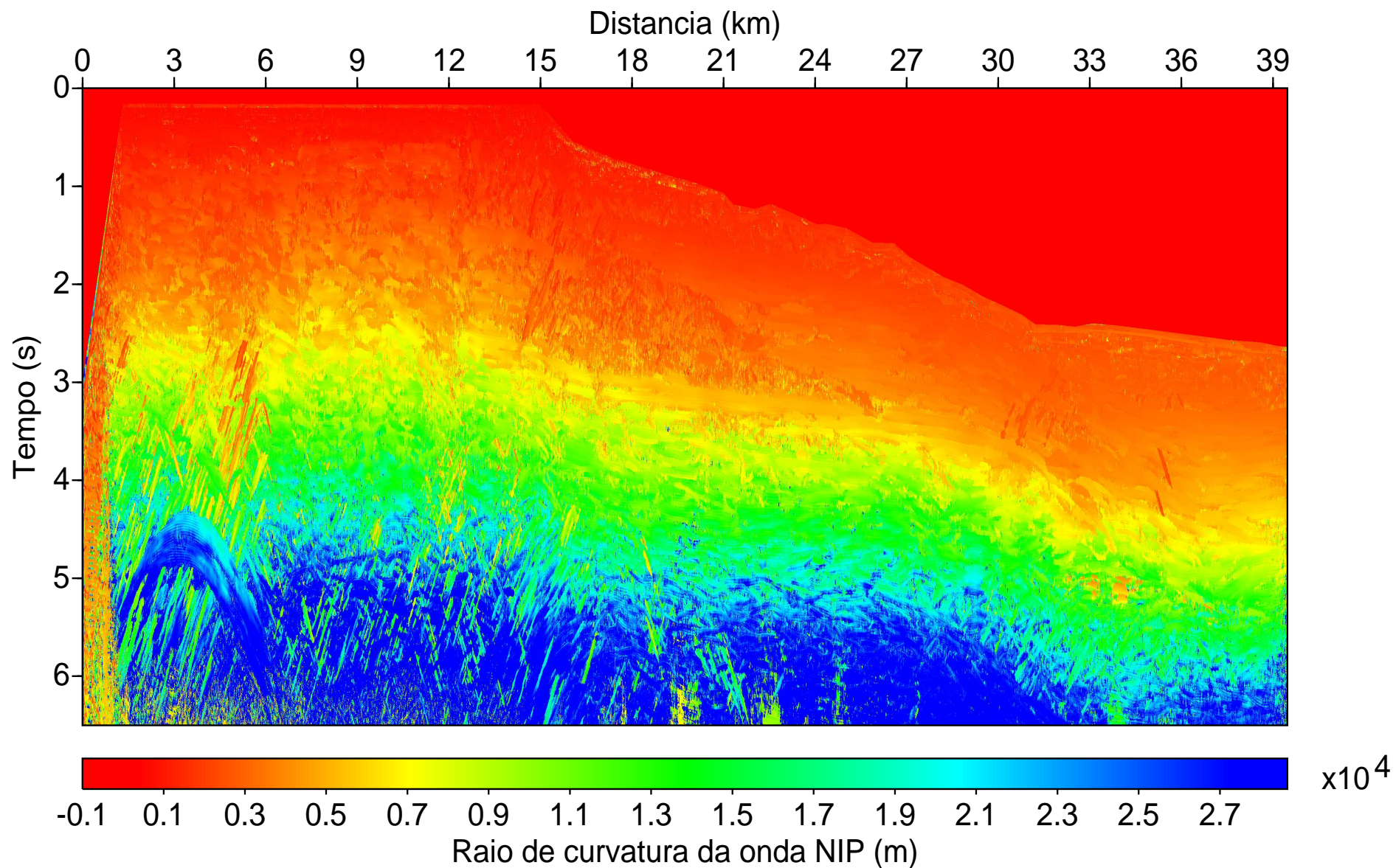


Figura 5.9: Seção raio de curvatura R_{NIP} do empilhamento CRS otimizado. Não foi aplicado ganho a esta imagem.

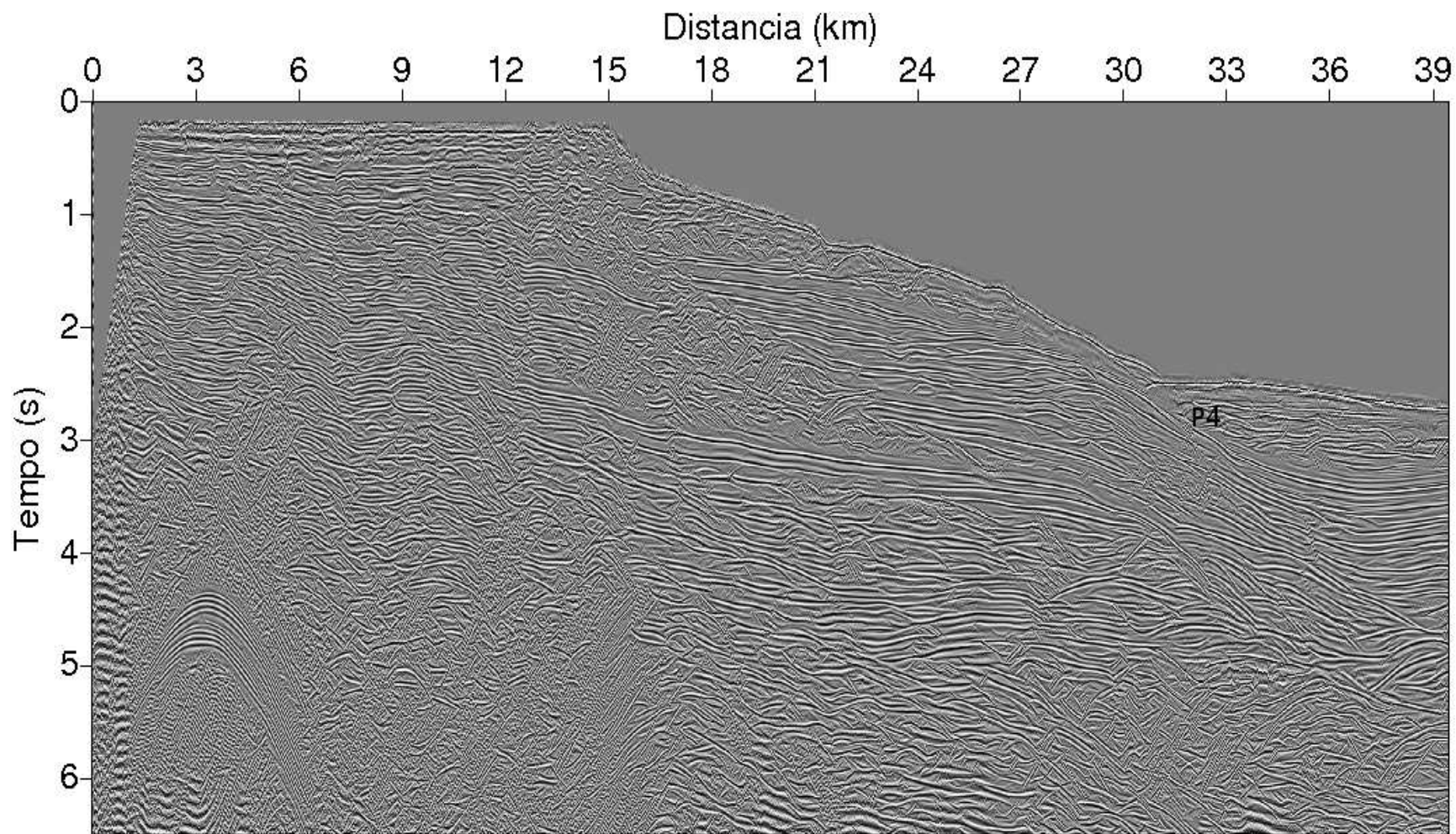


Figura 5.10: Seção empilhada CRS otimizada.

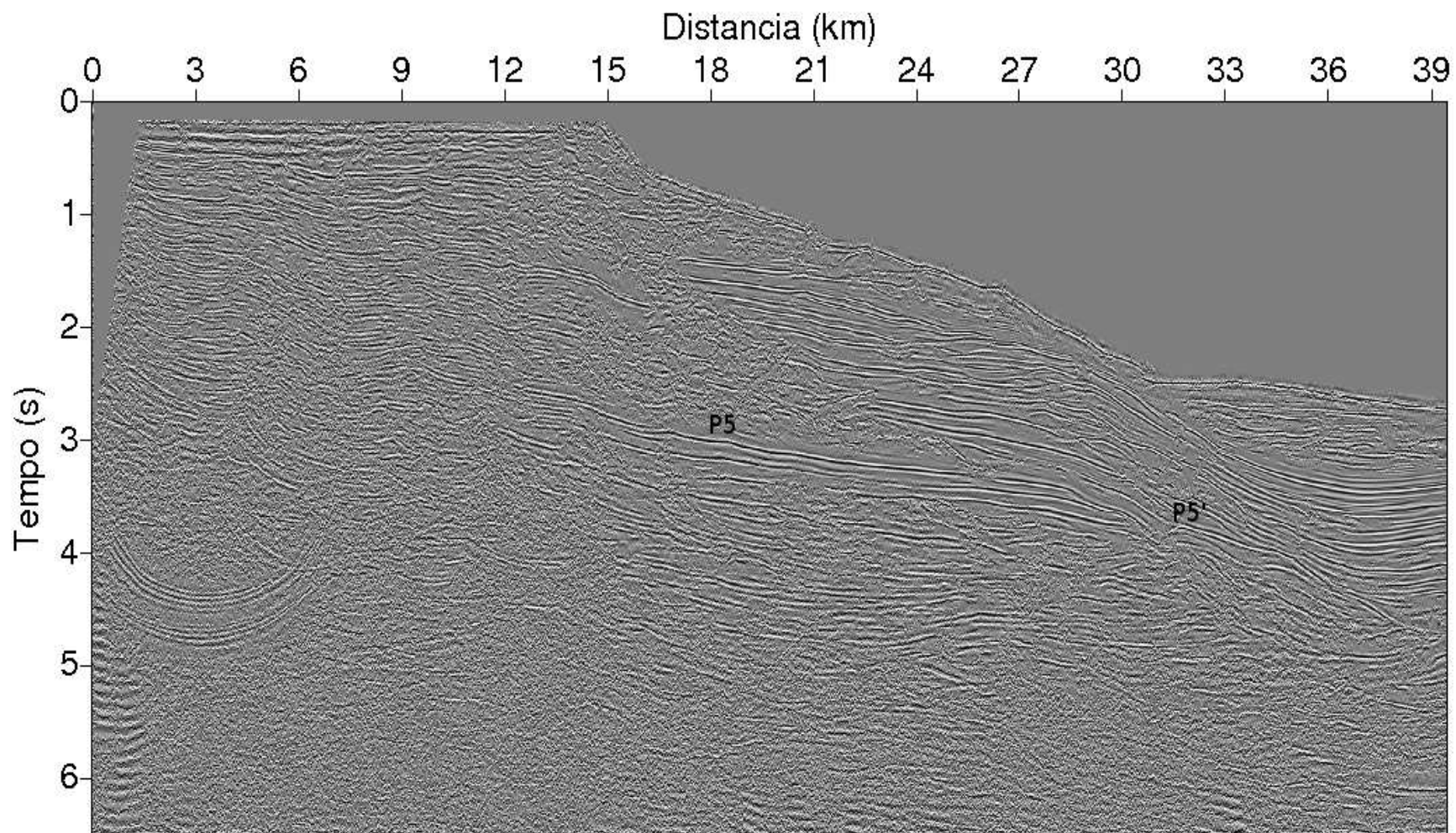


Figura 5.11: Seção CRS-migrada otimizada.

6 CONCLUSÕES

A primeira etapa do trabalho constou do pré-processamento, que é comum a ambas as metodologias aqui utilizadas. O pré-processamento constou da incorporação da geometria no cabeçalho do dado, edição de traços, filtragens, tratamento de múltiplas com as técnicas SRME e Radon, correção de amplitude e deconvolução ao impulso.

Na segunda etapa foi dado continuidade com o processamento NMO com a análise de velocidade semblance, que produziu uma distribuição de velocidades que serviu para realizar o empilhamento NMO do dado seguido pela migração. Paralelamente ao empilhamento NMO, o empilhamento CRS foi realizado considerando a formação das super-famílias CMP que buscou melhorar a razão sinal/ruído do dado pelo empilhamento CRS-parcial.

O dado processado apresenta relativa baixa qualidade, reflexo da complexidade geológica da região de aquisição e do desenvolvimento técnico do equipamento, e é também marcado pela forte presença de múltipla de superfície livre e alto índice de ruído aleatório. Assim sendo, boa parte dos esforços para o processamento se concentram na atenuação de múltiplas e no aumento da razão sinal/ruído das seções. Neste sentido, a aplicação das técnicas SRME e Radon demonstraram eficiência satisfatória para a atenuação da múltipla de superfície livre (compare as Figuras 4.10 e 4.11). E o empilhamento CRS-parcial foi importante para aumentar a relação sinal/ruído, permitindo um melhor realce dos eventos.

Em relação às seções empilhadas obtidas (compare as Figuras 4.21 e 5.10), a metodologia CRS apresentou melhor resultado, explicitando com maior clareza as interfaces refletoras e padrões de difração, além de imprimir melhor continuidade nos eventos, o que pode ser notado em P4 na Figura 5.10, por exemplo. Já em relação às seções migradas, se observou que nenhuma apresentou deslocamento considerável das estruturas de subsuperfície. Estas seções foram importantes no sentido de imprimir melhor continuidade e suavidade às interfaces refletoras observadas nas seções empilhadas. Nesta direção, a seção migrada gerada no algoritmo CRS apresentou qualidade superior à todas as seções, com maior razão sinal/ruído, maior continuidade e maior suavidade das interfaces refletoras, como observado em P5 e P5' na Figura 5.11, por exemplo.

Assim sendo, destaco que a metodologia CRS, considerando também o empilhamento CRS-parcial, mostrou grande eficiência no imageamento de dados relacionados a um ambiente

geológico complexo. Logo, fica sugerido que os fluxogramas apresentados sejam utilizados como um primeiro teste para o processamento de linhas com características semelhantes à linha L2140270 da bacia do Jequitinhonha, com destaque para as técnicas SRME e Radon para a atenuação de múltiplas e para o empilamento CRS-parcial para o aumento da qualidade visual das seções. Como perspectiva para uma futura continuidade deste trabalho, será obtido o modelo de velocidade em profundidade via tomografia NIP, visando a migração em profundidade das seções obtidas e uma futura interpretação das estruturas em subsuperfície.

REFERÊNCIAS

- AKI, K.; RICHARDS, P. G. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. [S.l.]: W. H. Freeman and Company, 1980.
- ALVES, R. C. C. *Aplicação de Técnicas de Tratamento e Interpretação de dados Sísmicos Oriundos da Bacia de Jequitinhonha, BA-BR*. [S.l.]: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal da Bahia, 2008.
- ANSTEY, N. A.; NEWMAN, P. The sectional auto-correlogram & the section retro-correlogram. *Geophysical Prospecting*, v. 14, p. 389–426, 1966.
- BAYKULOV, M. *Partial CRS Stack User's Manual*. [S.l.]: University of Hamburg, 2008.
- BAYKULOV, M.; GAJEWSKI, D. Prestack seismic data enhancement with partial common reflection surface (crs) stack. *Wave Inversion Technology*, Institute of Geophysics University of Hamburg, Hamburg, Germany, p. 57–73, 2008.
- BEYLKIN, G. Discrete radon transform. *ASSP*, n. 2, p. 162–172, 1992.
- CASTLE, R. J. *A theory of normal moveout*. [S.l.]: Geophysics, 1994. 984–999 p.
- COHEN, J. K.; STOCKWELL, J. J. W. Seismic un*x release n. 39. 2005.
- DEANS, S. R. *The Radon Transform and Some of its Applications*. [S.l.]: Krieger Publishing Company, 1993.
- DIX, C. H. *Seismic velocities from surface measurements*. [S.l.]: Geophysics, 1955. 68–86 p.
- DUVENECK, E. *Tomographic velocity model inversion with CRS*. [S.l.]: PhD Thesis. University of Karlsruhe, 2002.
- FOREL, D.; BENZ, T.; PENNINGTON, W. D. *Seismic Data Processing With Seismic Un*x - A 2D Seismic Data Processing Primer*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- FOSTER, D. J.; MOSHER, C. C. Suppression of multiples reflections using the radon transform. *Geophysics*, v. 57, n. 3, p. 386–395, 1992.
- GAJEWSKI, D.; VANELLE, C. Revisiting nmo again? EAGE 64th Conference & Technical Exhibition, 2002.
- HUBRAL, P.; KREY, T. *Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1980.

-
- 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. *Geophysics*, 1979.
- LEITE, L. W. B. *Introdução a Análise Espectral em Geofísica*. [S.l.]: FADESP, 1998.
- LIMA, H. M. *Processamento e Imageamento de Dados Sísmicos Marinhos. Dissertação de Mestrado*. [S.l.]: Universidade Federal do Pará, 2010.
- MANN, J. *Extensions and Applications of the Common-Reflection-Surface Stack Method*. [S.l.]: Universität Karlsruhe, 2002.
- MANN, J. *2-D Common-Reflection-Surface Stack User's Manual*. [S.l.]: University of Karlsruhe, 2003.
- MANN, J. et al. A seismic reflection imaging workflow based on common-reflection-surface stack. *Journal of Seismic Exploration*, n. 12, p. 283–295, 2003.
- MANN, J.; SCHLEICHER, J.; HERTWECK. Data stacking beyond cdp. 2006.
- MOHRIAK, W.; SZATMAN, P.; ANJOS, S. *Sal, Geologia e Tectônica - Exemplos nas Bacias Brasileiras*. [S.l.]: Beca, 2008.
- MÜLLER, T. *The Common Reflection Surface Method - Seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model*. [S.l.]: Universität Karlsruhe, 1999.
- NEIDELL, N. S.; TANER, M. T. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, v. 36, n. 3, p. 482–497, 1971.
- NEWMAN, P. Divergence effects in a layered earth. *Geophysics*, n. 38, p. 481–488, 1973.
- PEACOCK, K.; TREITEL, S. Predictive deconvolution: Theory and practice. v. 34, n. 2, p. 155–169, 1969.
- ROBINSON, E. A.; SILVIA, M. T. *Digital Foundations of Times Series Analysis: Wave-Equation Space-Time Processing*. [S.l.]: Holden-Day, 1981.
- ROBINSON, E. A.; TREITEL, S. Geophysical signal analysis. Society of Exploration Geophysicists, p. 278–279, 2000.
- SCHNEIDER, W. Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics*, v. 43, n. 1, p. 49–76, 1978.
- SHAH, P. M. Use of wavefront curvature to relative seismic data with subsurface parameters. *Geophysics*, v. 38, n. 5, p. 812–825, 1973.
- STOCKWELL, J. W.; K., C. J. *The new su user's manual*. [S.l.]: The Society of Exploration Geophysicists, USA. 1998.

THORSON, J. R. Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion. *Geophysics*, n. 50, p. 2727–2741, 1985.

URSIN, B. Offset-dependent geometrical spreading in a layered medium. *Geophysics*, v. 4, n. 55, p. 492–496, 1990.

VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WEPENAAR, P. A. Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, v. 57, n. 9, p. 1166–1177, 1982.

WATERS, K. H. *Reflection Seismology*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1986.

YILMAZ, O. *Seismic Data Processing*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1988.

APÊNDICES

APÊNDICE A – BUSCA PARAMÉTRICA DO OPERADOR CRS

Segundo Mann (2002), os atributos CRS que definem a superfície de empilhamento CRS são obtidos através da solução de um problema de otimização não-linear, global, tri-paramétrico. Os parâmetros iniciais $(\beta_0^{ini}, R_{NIP}^{ini}, R_N^{ini})$ para a otimização são obtidos por meio de três processos individuais, descrito a seguir como estratégias especializadas para o empilhamento baseada no semblance. Para as estratégias, a equação de partida é a eq. (5.5) e reescrita abaixo por conveniência:

$$t_{hip}^2(x_m, h) = \left[t(0) + 2\frac{\sin\beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + 2t(0)\frac{\cos^2\beta_0}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]. \quad (\text{A.1})$$

A.1 Parâmetro $q_{ini}(\beta_0, R_{NIP}; v_0)$

A eq. (A.1) depende de três parâmetros que controlam a forma do operador, e que pode ser simplificada para configurações específicas, como para $x_m = x_0$, o que resulta em:

$$t_{hip,CMP}^2(h) = t(0)^2 + 2\frac{t(0)\cos^2\beta_0}{v_0 R_{NIP}} h^2, \quad (\text{A.2})$$

nesta forma o operador de empilhamento depende de único parâmetro dado por:

$$q = \frac{\cos^2\beta_0}{R_{NIP}}. \quad (\text{A.3})$$

Comparando as eqs. (3.9) e (A.2), se conclui que:

$$v_{NMO}^2 = \frac{v_0}{2t(0)q}. \quad (\text{A.4})$$

A eq. (A.2) é relacionada à velocidade NMO, similar à velocidade de empilhamento v_E e escrita em termos de v_0 , β_0 e R_{NIP} , sendo o parâmetro q determinado pelo melhor valor de coerência no semblance, e guardado como q^{ini} . O resultado deste empilhamento ao longo da hipérbole A.2 gera a seção denominada Empilhamento Automático CMP.

A.2 Parâmetros β_0 e R_N

Na configuração AN, onde $x = 0$, a eq. (A.1) é reduzida à forma:

$$t_{hip,AN}^2(x_m) = \left[t(0) + 2 \frac{\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + 2t(0) \frac{\text{cos}^2 \beta_0}{v_0} \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N}; \quad (\text{A.5})$$

onde os parâmetros são β_0 e R_N . Uma aproximação de primeira ordem em $(x_m - x_0)$, simplifica A.5 à forma:

$$t_{PW,AN}(x_m) = t(0) + 2 \frac{\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m - x_0); \quad (\text{A.6})$$

onde o índice *PW* indica a condição de onda-plana em propagação com inclinação β_0 , que é determinado para um intervalo de ângulos que busca o melhor valor de coerência guardado como β_0^{ini} . Na sequência, com o valor de β_0^{ini} e a eq. (A.3), o parâmetro R_{NIP}^{Ini} é calculado, e com a eq. (A.5) se calcula R_N^{Ini} no diretório de produtos CRS. Com o conjunto $(\beta_0^{Ini}, R_N^{Ini}, R_{NIP}^{Ini})$ efetua-se o empilhamento CRS-inicial, cujos produtos são identificados pelas terminações **.Ini***. Até esta etapa, os valores iniciais dos parâmetros estão estimados e a próxima etapa é a otimização onde é usado o poliendro flexível Simplex, com os resultados identificados pela terminação **.Opt*** no diretório de produtos CRS.

APÊNDICE B – CRSSTACK_511

NAME

crsstack_511

VERSION

5.1.3 25.04.2005

DESCRIPTION

Macro-velocity model independent simulation
of 2D zero-offset (ZO) sections from multi-coverage
2D or quasi 2D data sets
considering arbitrary measurement surface topography

USAGE

crsstack_511 [par=parfile(s)] [tag=value]...

FILES

all section files are in Seismic Un*x (SU) format

NOTES ON TOPOGRAPHY EXTENSIONS:

===== >

we also need to explain the following options:

correct_Data (writeData)
R_topo (RT_Optimize)
reda_elev (Redatum)
reda_secs (Redatum)
s_sec (Redatum)
s_sec_type: (sta, rad, att) (Redatum)
min_coh (Redatum)
max_coh (Redatum)
min_coh_t (Redatum)
max_coh_t (Redatum)
smoothingcycles (Topography)
topoaper (Topography)
taperstart (Topography)

>

INPUT/OUTPUT

>

input: 2D or quasi 2D multi-coverage data set
no regular grid required,

straight profile is determined automatically.
 All traces must have the same number of samples, sampling rate, and time delays.
 CDP nos. must increase/decrease strictly monotonously along profile.

output:

For smooth topographic-curve determination:

```
=====>
*.Original_SurfPts.dat:
*.Smoothed_SurfPts.dat:
*.Smoothed_CMPs.dat:
==< Those were the files, which can be evaluated with plotting tools
*.Original_SurfPts.bin:
*.Smoothed_SurfPts.bin:
*.Smoothed_CMPs.bin:
==< Those were the files, which will be reread after consecutive uses
==< of the program.
```

For prestack-data output with applied static corrections and the corresponding straight profile header-values set.

```
=====>
*.Data.su
```

For automatic CMP stack:

```
=====>
*.CMPq:      q section determined by automatic CMP stack
*.CMPcoher:  Coherency section associated with *.CMPq
*.CMPvnm2:   Squared stacking velocity computed from *.CMPq
*.CMPtraces: Number of traces contributing to automatic CMP stack
*.CMPstack:  Result of automatic CMP stack
```

For plane wave and hyperbolic ZO search approach:

```
=====>
(n refers to the nth detected event contributing to a particular sample)
*.PWcoher_n: Coherency section associated with plane wave ZO search
*.PWstack:   Result of plane wave ZO stack
*.PWtraces:  Number of traces contributing to plane wave ZO stack
*.HYcoher_n: Coherency section associated with hyperbolic ZO search
*.HYstack:   Result of hyperbolic ZO stack
*.HYtraces:  Number of traces contributing to hyperbolic ZO stack
```

Attributes resulting from 3x1 parametric search approach:

```
=====>
*.Condips:      Number of detected dips
```

*.IniRnip: Section with intermediate values of Rnip
 *.Iniangle_n: Section with initial values of emergence angle
 *.IniRnip_n: Section with initial values of Rnip
 *.IniRn_n: Section with initial values of Rn
 ==< Those were the attributes in locally, rotated coordinate systems for each trace
 ==< The later three sections can be handed over directly to the smooth optimization

*.IniRnip_out: Section with intermediate values of Rnip
 *.Iniangle_out_n: Section with initial values of emergence angle
 *.IniRnip_out_n: Section with initial values of Rnip
 *.IniRn_out_n: Section with initial values of Rn
 ==< Those were the attributes in one global coordinate system for all traces
 ==< The later three sections can be handed over directly to the rough optimization

For initial (not optimized) CRS stack:

=====>
 *.Inistack: Result of initial CRS stack
 *.IniFstack: Result of initial CRS stack in projected Fresnel zone
 *.Initraces: Number of traces contributing to initial CRS stack
 *.Inicoher_n: Coherency section associated with initial CRS stack
 *.IniPTM: Pseudo time-migrated section of initial CRS stack
 *.IniFPTM: dto., in projected Fresnel zone

For optimized CRS stack with the smooth-topography approximation:

=====>
 *.Optangle_n: Section with optimized values of emergence angle
 *.OptRnip_n: Section with optimized values of Rnip
 *.OptRn_n: Section with optimized values of Rn
 ==< Those were the attributes in locally, rotated coordinate systems for each trace
 *.Optangle_out_n: Section with optimized values of emergence angle
 *.OptRnip_out_n: Section with optimized values of Rnip
 *.OptRn_out_n: Section with optimized values of Rn
 ==< Those were the attributes in one global coordinate system for all traces
 ==< The later three sections can be handed over directly to the rough optimization

*.Optstack: Result of optimized CRS stack
 *.OptFstack: Result of optimized CRS stack in projected first Fresnel zone
 *.OptPTM: Pseudo time-migrated section of optimized CRS stack
 *.OptFPTM: dto., in projected Fresnel zone
 *.Opttraces: Number of traces contributing to restricted CRS stack
 *.Optcoher_n: Coherency section associated with optimized CRS stack
 *.Optsuccess_n: Difference of initial and optimized coherency
 *.Optiter_n: Number of optimization iterations
 *.Opteps_n: Mean geometrical deviation of final vertices

For optimized CRS stack with the rough-topography approximation:

=====>
 *.RT_Optangle_n: Section with optimized values of emergence angle

*.RT_OptRnip_n: Section with optimized values of Rnip
 *.RT_OptRn_n: Section with optimized values of Rn
 *.RT_Optstack: Result of optimized CRS stack
 *.RT_OptFstack: Result of optimized CRS stack using projected first Fresnel zone
 *.RT_OptPTM: Pseudo time-migrated section of optimized CRS stack
 *.RT_Opttraces: Number of traces contributing to restricted CRS stack
 *.RT_Optcoher_n: Coherency section associated with optimized CRS stack
 *.RT_Optsuccess_n: Difference of initial and optimized coherency
 *.RT_Optiter_n: Number of optimization iterations
 *.RT_Opteps_n: Mean geometrical deviation of final vertices

For residual static estimation:

=====>

*.RESsource: Binary file with source locations and corresponding statics as floats
 format: sx sy sstat scontno 0/1
 The last column with '0' or '1' indicates whether this static value was applied or not depending on 'mincorrstack'!

*.RESsource.asc: same as *.RESsource but in ASCII

*.RESreceiver: Binary file with receiver locations and corresponding statics as floats
 format: gx gy gstat gcontno 0/1

*.RESreceiver.asc: same as *.RESreceiver but in ASCII

*.REStotal: Binary file with trace locations and corresponding statics as floats
 format: tracl cdp sx sy sstat scontno gx gy gstat gcontno tstat

*.REStotal.asc: same as *.REStotal but in ASCII

*.RESsourcecorrstack: Section with stacked cross correlations for source locations

*.RESreceivercorrstack: Section with stacked cross correlations for receiver locations

*.RESeventtimes.asc: ASCII-file containing the 'tmin' and 'tmax' values used for the cross correlations for each CDP location

Optional output for residual static estimation:

(depends on 'output', needs the same amount of hard disk space as the input file and is written to the same path on hard disk!)

'input' + '.REScorr': input file with estimated residual static corrections applied and added to header keys: sstat, gstat, and tstat
 (depends on 'corrstack', needs VERY much additional free hard disk space!)

*.REScrosscorr_cdp#n#: Sections with cross correlation results

*.RESsupergather_cdp#n#: Sections with moveout corrected traces

*.RESmultiplicity_cdp#n#: Sections with corresponding coherence
 #n# denotes the cdp number attached to the file name

For redatuming of CRS stack results:

```
=====>
*.#angle_n_Redatumed:   Section with optimized values of emergence angle
*.#Rnip_n_Redatumed:    Section with optimized values of Rnip
*.#Rn_n_Redatumed:      Section with optimized values of Rn
*.#stack_Redatumed:     Result of optimized CRS stack
*.#coher_n_Redatumed:   Coherency section associated with optimized CRS stack
*.#[*]_Redatumed:       Additional section chosen arbitrarily (stack, angle, radius)
note:                    # refers to either Ini, Opt or RT_Opt results
```

```
##### >
PARAMETERS FROM PAR
##### >
```

GENERAL PARAMETERS

```
=====>
verbose - integer: [0] only show warnings and errors
                  1 show additional information
datapath - char[ ]: Pathname for I/O data files
                  (applies to data filenames not beginning with / or .)
basename - char[ ]: Basename for all I/O datafiles except pre-stack data
                  and reference stacking velocity files
input - char[ ]:   name of pre-stack data file
logfile - char[ ]: Filename for process log
survel - float:    Constant near-surface velocity
survelfile - char[ ]: Variable near-surface velocity defined by corresponding Ascii-file
                  format: x-coordinate, y-coordinate, velocity
```

REFERENCE MODEL FOR STACKING VELOCITY

```
=====>
vnmoref - char[ ]: Section with reference stacking velocities
                  (Negative values correspond to imaginary velocities)
vnmovar - float: [0.] Percentile variation of stacking velocity
                  (if 0, use vnmoref as lower limit)
vnmomin - float:  Minimum stacking velocity (alternative to vnmoref)
                  (Negative values correspond to imaginary velocities)
vnmomax - float:  Maximum stacking velocity (if vnmovar==0)
```

MODE SELECTION PARAMETERS

```
=====>
autoCMPstack - int:[1] Flag: perform automatic CMP stack
ZOsearch      - int:[1] Flag: perform ZO search/stack
Inistack      - int:[1] Flag: perform CRS stack with initial attributes.
                  For conflicting dip situations, Rnip is determined, too.
Optimize      - int:[0] Flag: perform attribute optimization and stack
                  For smooth-topography travelttime formula and static corrections
RT_Optimize   - int:[0] Flag: perform attribute optimization and stack
                  For rough-topography travelttime formula
```

Resstatic - int:[0] Flag: perform residual static estimation
 Redatum - int:[0] Flag: perform remapping of attributes and stacking results
 to a plane above the measurement surface
 migmap - int:[0] Flag: generate migration map
 writeData - int:[0] Flag: generate prestack data with applied static corrections

TRACE DISCRIMINATION PARAMETERS

=====>

maxangdev - float: [90] Maximum allowed angle between any shot/receiver
 line and the profile line (in degrees)
 maxshift - float: [oo] Maximum allowed distance between any CMP and
 the profile line
 minoffset - float: Smallest offset to be considered,
 default value is smallest offset in input data
 maxoffset - float: Largest offset to be considered,
 default value is largest offset in input data
 maxaop - float: [oo] Largest product of angle between shot/receiver
 and profile and the respective offset
 (This allows larger deviations for small offsets.)

MUTING OF TARGET ZONE

=====>

mutetime - float[]: List of picked minimum times to be simulated
 mutecdp - int[]: List of associated picked CDP numbers
 (default: no muting)

TRANSFORMATION OF INPUT DATA

=====>

convop - integer: [0] Use original data for coherence analysis
 1 use the trace envelopes instead
 2 use normalized traces instead
 3 use normalized analytic signal

TARGET ZONE PARAMETERS

=====>

fcpd - integer: Smallest CDP to simulated (default min(CDP))
 lcdp - integer: Largest CDP to simulated (default max(CDP))
 jcdp - integer: [0] Number of CDPs to skip between simulated traces
 dt - float: Time sampling interval for the target zone [s]
 t0 - float: Time offset for the target zone [s]
 ns - int: Number of samples per output trace
 (The preceding three values default to the according
 values in the input data set)

PARAMETERS FOR CONFLICTING DIP HANDLING

=====>

ndips - int: [1] Maximum number of conflicting dips (<=5)
 globcohthresh - float: Smallest global maximum coherence to allow for

relcothresh - float: conflicting dips
Smallest local maximum coherence relative to global
maximum to allow for conflicting dips

PARAMETERS FOR COHERENCE CRITERIA

=====>
coherence - int: [0] Coherence criterion is semblance
1 mean of (cohband) semblance values
2 Sum of samples (trivial)
cohband - int: Halfwidth of coherence analysis area in samples,

PARAMETERS FOR AUTOMATIC CMP SEARCH/STACK

=====>
qdtfac - float: [1.] Factor for sampling rate in q search related to input
qiter - int: [3] Number of iterations in q search

PARAMETERS FOR ANGLE AND Rn SEARCH

=====>
maxangle - float: [60.] Maximum angle to be searched for
minangle - float: Minimum angle to be searched for, default -maxangle
dangle - float: [1.] Increment for first iteration of angle search
angleiter - int: [3] Number of iterations in angle search
Rndtfac - float: [1.] Factor for sampling rate in Rn search related to input
Rniter - int: [3] Number of iterations in Rn search

PARAMETERS FOR INITIAL STACK

=====>
(only required in case of conflicting dips)
Rnipdtfac - float: [1.] Factor for sampling rate in Rnip search related to input
Rnipiter - int: [3] Number of iterations in Rnip search

PARAMETERS FOR BOTH OPTIMIZATIONS

=====>
mincothresh - float: Coherence threshold for smallest traveltime
maxcothresh - float: Coherence threshold for largest traveltime
optiter - int: [100] Maximum number of optimization iterations minimum is 10.
opteps - float: [.0001] Maximum mean geometrical deviation to terminate
transrad - float [100.] Radius for Rn transformation
varangle - float: [6.] Variation of emergence angle in degrees
varRnip - float: [5.] Percentile variation of Rnip
varRn - float: [6.] Variation of transformed Rn in degrees

PARAMETERS FOR RESIDUAL STATIC ESTIMATION

=====>
eventtimes - char []: ASCII-file containing 'tmin' and 'tmax' for
different CDP locations
format: CDP tmin tmax
If not set, 'tmin' and 'tmax' are mandatory!
tmin - float: Minimum traveltime to consider for cross

tmax - float:	correlation [s] (alternative to 'eventtimes') Maximum travelttime to consider for cross correlation [s] (alternative to 'eventtimes')
maxtshift - int:	Maximum time shift for cross correlation [ms]
windowing - int:	[2] moveout corrected window and pilot window are extended to fully overlap with each other during cross correlation 1 moveout corrected window is extended to fully overlap with pilot window 0 standard windowing, values smaller tmin or larger tmax are zeroed out
optattrib - int:	[0] Using initial CRS-attributes for moveout correction 1 Using optimized CRS-attributes for moveout correction
Fstack - int:	[0] stacked trace used as pilot trace 1 Fresnel stacked trace used as pilot trace
multi - int:	[0] multiplicity set to 0 or 1 1 coherence used as multiplicity
corrstack - int:	[0] additional output of correlation stacks only 1 additional output of correlation results for each prestack trace and correlation stacks 2 additional output of moveout corrected traces, corresponding multiplicity, and correlation results for each prestack trace and correlation stacks
norm - int:	[0] no normalization 1 normalize cross correlation with energy of the correlated traces
minsamp - int:	[0] minimum number of 'live' sample in moveout corrected trace
pickshift - int:	[0] pick global maximum in correlation stack 1 pick local maximum closest to no time shift 2 center of area around global maximum, borders given by pickthresh * global maximum 3 center of area around local maximum, borders given by pickthresh * local maximum
pickthresh - float:	[.3] threshold for finding borders around global/local maximum
mincorrstack - int:	[0,0] minimum number of cross correlation stacks to consider estimated time shifts for the subsequent correction. First value for source time shifts, second value for receiver time shifts. One value will set both equal
output - int:	[0] only the

APERTURE PARAMETERS

=====>	
minoffsetap - float:	Offset aperture for travelttime \leq minofftime,
minofftime - float:	Travelttime at which minoffsetap applies,

default is smallest traveltime in input
 maxoffsetap - float: Offset aperture for traveltime \geq maxofftime,
 default (and upper limit) is maxoffset
 maxofftime - float: Traveltime at which maxoffsetap applies,
 default is largest traveltime in input
 minxap - float: Minimum aperture halfwidth in ZO section
 for traveltime 0.
 maxxap - float: Maximum aperture in ZO section
 shotint -float: Average shot interval (for initial stack only)
 avgvel - float: Average model velocity, default is surve1
 wavefr - float: Mean frequency of signal wavelet. wavefr and avgvel
 enter into the determination of the ZO aperture.
 tapratio - float: [.3] Relative size of cosine tapered aperture,
 valid range 0. to 1.
 pwaperfac - float:[.3] Relative size of aperture for plane wave search,
 valid range .1 to .9

>
 COMMENTS

=====>

‘oo’ denotes infinity.

Most parameters are handled as absolute values.

All offsets refer to the FULL (not half) offset.

CATEGORY

Stacking procedure

AUTHORS

Main Program:

Juergen Mann, Baerbel Traub, and Alexander Gerst

Juergen.Mann@gpi.uni-karlsruhe.de

Topography Extension:

Zeno Heilmann, Markus von Steht

Zeno.Heilmann@gpi.uni-karlsruhe.de

Residual Static Correction Extension:

Ingo Koglin, Erik Ewig

Ingo.Koglin@gpi.uni-karlsruhe.de

ADDITIONAL CODE

Hilbert transformation, sinc interpolation, and SEG-Y
 header description are part of the Seismic Un*x package.

REFERENCE

Mann, J., Jaeger, R., Mueller, Th., Hoecht, G., and Hubral, P.:

Common-reflection-surface stack - a real data example.

Journal of Applied Geophysics, 42, pp. 301-318, 1999.

Mann, J.: Extensions and Applications of the Common-Reflection-Surface
 Stack Method. PhD Thesis, Logos Verlag, Berlin, 2003.

Koglin, I.: Estimation of Residual Static Time Shifts by means of the CRS-based Residual Static Correction Approach. PhD Thesis, Logos Verlag, Berlin, 2006.

Heilmann, Z.: CRS-stack-based seismic reflection imaging for land data in time and depth domains. PhD Thesis, <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2007/physik/5/5.pdf>, 2007.

APÊNDICE C – CRSSTACK_SUPERGATHERS

NAME

crsstack_supergathers

DESCRIPTION

Macro-velocity model independent simulation
of 2D zero-offset (ZO) sections from multi-coverage
2D or quasi 2D data sets

USAGE

crsstack_supergathers [par=parfile(s)] [tag=value]...

FILES

all section files are in Seismic Un*x (SU) format

INPUT/OUTPUT

input: 2D or quasi 2D multi-coverage data set
no regular grid required,
straight profile is determined automatically.
All traces must have the same number of samples, sampling
rate, and time delays.
CDP nos. must increase/decrease strictly monotonously
along profile.

For automatic CMP stack:

*.CMPq: q section determined by automatic CMP stack
*.CMPcoher: Coherency section associated with *.CMPq
*.CMPvnmo2: Squared stacking velocity computed from *.CMPq
*.CMPtraces: Number of traces contributing to automatic CMP stack
*.CMPstack: Result of automatic CMP stack

For plane wave and hyperbolic ZO search approach:

(n refers to the nth detected event contributing to a particular sample)
*.PWcoher_n: Coherency section associated with plane wave ZO search
*.PWstack: Result of plane wave ZO stack
*.PWtraces: Number of traces contributing to plane wave ZO stack
*.HYcoher_n: Coherency section associated with hyperbolic ZO search
*.HYstack: Result of hyperbolic ZO stack
*.HYtraces: Number of traces contributing to hyperbolic ZO stack

Attributes resulting from 3x1 parametric search approach:

*.Condips: Number of detected dips
*.Iniangle_n: Section with initial values of emergence angle
*.IniRnip:

Section with intermediate values of Rnip
 *.IniRnip_n: Section with initial values of Rnip
 *.IniRn_n: Section with initial values of Rn
 For initial (not optimized) CRS stack:
 *.Inistack: Result of initial CRS stack
 *.IniFstack: Result of initial CRS stack in projected Fresnel zone
 *.Initraces: Number of traces contributing to initial CRS stack
 *.Inicoher_n: Coherency section associated with initial CRS stack
 *.IniPTM: Pseudo time-migrated section of initial CRS stack
 *.IniFPTM: dto., in projected Fresnel zone
 For optimized CRS stack:
 *.Optangle_n: Section with optimized values of emergence angle
 *.OptRnip_n: Section with optimized values of Rnip
 *.OptRn_n: Section with optimized values of Rn
 *.Optstack: Result of optimized CRS stack
 *.OptFstack: Result of optimized CRS stack in projected Fresnel zone
 *.OptPTM: Pseudo time-migrated section of optimized CRS stack
 *.OptFPTM: dto., in projected Fresnel zone
 *.Opttraces: Number of traces contributing to restricted CRS stack
 *.Optcoher_n: Coherency section associated with optimized CRS stack
 *.Optsuccess_n: Difference of initial and optimized coherency
 *.Optiter_n: Number of optimization iterations
 *.Opteps_n: Mean geometrical deviation of final vertices

PARAMETERS FROM PAR GENERAL PARAMETERS

verbose - integer: [0] only show warnings and errors
 1 show additional information
 datapath - char[]: Pathname for I/O data files
 (applies to data filenames not beginning with / or .)
 basename - char[]: Basename for all I/O datafiles except pre-stack data
 and reference stacking velocity files
 input - char[]: name of pre-stack data file
 logfile - char[]: Filename for process log
 surve1 - float: Near surface velocity

REFERENCE MODEL FOR STACKING VELOCITY

vnmoref - char[]: Section with reference stacking velocities
 (Negative values correspond to imaginary velocities)
 vnmovar - float: [0.] Percentile variation of stacking velocity
 (if 0, use vnmoref as lower limit)
 vnmomin - float: Minimum stacking velocity (alternative to vnmoref)
 (Negative values correspond to imaginary velocities)
 vnmomax - float: Maximum stacking velocity (if vnmovar==0)

MODE SELECTION PARAMETERS

autoCMPstack - int: [1] Flag: perform automatic CMP stack
 ZOsearch - int: [1] Flag: perform ZO search/stack

Inistack - int: [1] Flag: perform CRS stack with initial attributes.
 For conflicting dip situations, Rnip is determined, too.
 Optimize - int: [0] Flag: perform attribute optimization and stack
 Supergathers - int: [0] Flag: generate CRS supergathers
 migmap - int: [0] Flag: generate migration map

TRACE DISCRIMINATION PARAMETERS

maxangdev - float: [90] Maximum allowed angle between any shot/receiver
 line and the profile line (in degrees)
 maxshift - float: [oo] Maximum allowed distance between any CMP and
 the profile line
 minoffset - float: Smallest offset to be considered,
 default value is smallest offset in input data
 maxoffset - float: Largest offset to be considered,
 default value is largest offset in input data
 maxaop - float: [oo] Largest product of angle between shot/receiver
 and profile and the respective offset
 (This allows larger deviations for small offsets.)

MUTING OF TARGET ZONE

mutetime - float[]: List of picked minimum times to be simulated
 mutecdp - int[]: List of associated picked CDP numbers
 (default: no muting)

TRANSFORMATION OF INPUT DATA

convop - integer: [0] Use original data for coherence analysis
 1 use the trace envelopes instead
 2 use normalized traces instead
 3 use normalized analytic signal

TARGET ZONE PARAMETERS

fcpd - integer: Smallest CDP to simulated (default min(CDP))
 lcdp - integer: Largest CDP to simulated (default max(CDP))
 jcdp - integer: [0] Number of CDPs to skip between simulated traces
 dt - float: Time sampling interval for the target zone [s]
 t0 - float: Time offset for the target zone [s]
 ns - int: Number of samples per output trace
 (The preceding three values default to the according
 values in the input data set)

PARAMETERS FOR CONFLICTING DIP HANDLING

ndips - int: [1] Maximum number of conflicting dips (<=5)
 globcohthresh - float: Smallest global maximum coherence to allow for
 conflicting dips
 relcohthresh - float: Smallest local maximum coherence relative to global
 maximum to allow for conflicting dips

PARAMETERS FOR COHERENCE CRITERIA

coherence - int: [0] Coherence criterion is semblance

1 mean of (cohband) semblance values
 2 Sum of samples (trivial)
 cohband - int: Halfwidth of coherence analysis area in samples,

PARAMETERS FOR AUTOMATIC CMP SEARCH/STACK

qdtfac - float: [1.] Factor for sampling rate in q search related to input
 qiter - int: [3] Number of iterations in q search

PARAMETERS FOR ANGLE AND R_n SEARCH

maxangle - float: [60.] Maximum angle to be searched for
 minangle - float: Minimum angle to be searched for, default -maxangle
 dangle - float: [1.] Increment for first iteration of angle search
 angleiter - int: [3] Number of iterations in angle search
 Rndtfac - float: [1.] Factor for sampling rate in R_n search related to input
 Rniter - int: [3] Number of iterations in R_n search

PARAMETERS FOR INTIAL STACK

(only required in case of conflicting dips)

Rnipdtfac - float: [1.] Factor for sampling rate in Rnip search related to input
 Rnipiter - int: [3] Number of iterations in Rnip search

PARAMETERS FOR OPTIMIZATION

mincohthresh - float: Coherence threshold for smallest travelttime
 maxcohthresh - float: Coherence threshold for largest travelttime
 optiter - int: [100] Maximum number of optimization iterations
 minimum is 10.
 opteps - float: [.0001] Maximum mean geometrical deviation to terminate
 transrad - float: [100.] Radius for R_n transformation
 varangle - float: [6.] Variation of emergence angle in degrees
 varRnip - float: [5.] Percentile variation of Rnip
 varRn - float: [6.] Variation of transformed R_n in degrees

APERTURE PARAMETERS

minoffsetap - float: Offset aperture for travelttime ≤ minofftime,
 minofftime - float: Travelttime at which minoffsetap applies,
 default is smallest travelttime in input
 maxoffsetap - float: Offset aperture for travelttime ≥ maxofftime,
 default (and upper limit) is maxoffset
 maxofftime - float: Travelttime at which maxoffsetap applies,
 default is largest travelttime in input
 minxap - float: Minimum aperture halfwidth in ZO section
 for travelttime 0.
 maxxap - float: Maximum aperture in ZO section
 shotint - float: Average shot interval (for initial stack only)
 avgvel - float: Average model velocity, default is survel
 wavefr - float: Mean frequency of signal wavelet. wavefr and avgvel
 enter into the determination of the ZO aperture.
 tapratio - float: [.3] Relative size of cosine tapered aperture,
 valid range 0. to 1.

pwaperfac - float: [.3] Relative size of aperture for plane wave search,
valid range .1 to .9

SUPERGATHERS PARAMETERS

offsign - integer: 0 Use negative offsets in supergathers
 [1] Use positive offsets in supergathers
recint - float: [] Average receiver interval in generated supergathers
offreg - integer: 0 Use offset bins derived from the data
 [1] Use regular offset bins with interval defined by recint
offap - float: [] Offset aperture used in partial stacking, default is recint

COMMENTS

'oo' denotes infinity.
Most parameters are handled as absolute values.
All offsets refer to the FULL (not half) offset.

CATEGORY

Stacking procedure

AUTHORS

Juergen Mann, Baerbel Traub, and Alexander Gerst
Juergen.Mann@gpi.uni-karlsruhe.de

ADDITIONAL CODE

Hilbert transformation and SEG-Y header description
are part of the Seismic Un*x package.

REFERENCE

Mann, J., Jaeger, R., Mueller, Th., Hoecht, G., and Hubral, P.:
Common-reflection-surface stack - a real data example.
Journal of Applied Geophysics, 42, pp. 301-318, 1999.