



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROCESSAMENTO, INVERSÃO E
IMAGEAMENTO DE DADOS SÍSMICOS
MARINHOS**

DOUGLAS AUGUSTO BARBOSA DA SILVA

BELÉM
2012

DOUGLAS AUGUSTO BARBOSA DA SILVA

**PROCESSAMENTO, INVERSÃO E
IMAGEAMENTO 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 Willame
Barbosa Leite

BELÉM
2012

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

S586p Silva, Douglas Augusto Barbosa da

Processamento, inversão e imageamento de dados sísmicos Marinhos /
Douglas Augusto Barbosa da Silva; Orientador: Lourenildo Willame
Barbosa Leite 2012.

186 fl.: il.

Dissertação (mestrado em geofísica) Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica,
Belém, 2012.

1. Método de reflexão sísmica. 2. Análise de velocidade sísmica.
3. Empilhamento sísmico. 4. Inversão sísmica. 5. Imageamento sísmico.
6. Migração sísmica. I. Leite, Lourenildo Willame Barbosa, *orient.* II.
Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22º ed.: 551.22

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

PROCESSAMENTO, INVERSÃO E IMAGEAMENTO DE
DADOS SÍSMICOS MARINHOS

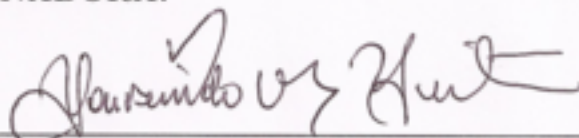
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

DOUGLAS AUGUSTO BARBOSA DA SILVA

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

Data de Aprovação: ____/____/____

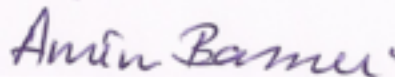
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Lourenildo Willame Barbosa Leite - UFPA (Orientador)



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



Prof. Dr. Amin Bassrei - UFBA (Membro)

BELÉM
2012

À minha esposa Suzana Gomes Melo por ter sido muito paciente e compreensiva todos esses
anos de estudos extremamente complicados.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço à Deus por ter me dado forças nos momentos mais difíceis, permitindo a conclusão de mais uma etapa de sucesso em minha vida.

Ao Prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite pela confiança em mim creditada, pela sugestão do tema, por todo o conhecimento e experiência repassados ao longo destes anos de saudável e produtiva convivência sob sua orientação e pela enorme paciência com um aluno tão difícil.

À minha amada esposa Suzana Gomes Melo por tudo que representa em minha vida, por ter me incentivado a realizar mais esta etapa dos estudos, por sempre acreditar na minha capacidade e pelo prazer de, a cada dia, me ensinar a ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais José A. F. Silva e Maria C. B. Farias por terem abdicado de tantas coisas em prol dos meus estudos e por sempre terem me ensinado o caminho do bem.

Aos meus irmãos Diego A. B. Silva e Vanessa B. Silva pelo apoio, companheirismo e amizade.

Aos Profs. Drs. Amin Bassrei, Jessé C. Costa e João C. R. Cruz pelo tempo disponibilizado para a leitura, por todos os conselhos e pelas diversas sugestões que muito contribuíram para a melhora deste trabalho.

À Profa. Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes, coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geofísica, pela ótima infra-estrutura e grande apoio fornecido aos discentes.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geofísica da UFPA por todo o conhecimento repassado.

Aos amigos João B. R. Afonso e Wildney W. S. Vieira pelas ajudas valiosas com o programa *nptomo* e a migração Kirchhoff, respectivamente.

Aos colegas Alan S. Nunes, Felipe A. V. Pena, João B. S. Filho e Nonato C. Colares, pelas discussões sempre muito proveitosas e por ajudarem a tornar a rotina do dia-a-dia acadêmico um pouco menos entediante.

Às minhas amigas Benildes Lopes e Lucibela Soares, secretárias do Programa de Pós-graduação em Geofísica, pela disponibilidade e eficiência em tornar menos complexa nossa

conturbada vida acadêmica.

À FINEP/Petrobras pelo apoio à pesquisa e que me permitiu desenvolver e concluir este trabalho de mestrado no CPGF da UFPA.

À CAPES e ao CNPQ pelo auxílio financeiro durante o curso, sem o qual a realização deste trabalho seria improvável.

“Não há obra de arte mais bem acabada do que um ser humano educado”.
(Aristóteles)

RESUMO

Este trabalho constou do estudo e do processamento, inversão e imageamento em tempo e em profundidade de dados sísmicos Marmousi, e do real Jequitinhonha obtido na plataforma continental oriental atlântica brasileira do estado da Bahia. Foram aplicados os métodos de empilhamento NMO e CRS, e a técnica de inversão niptomográfica dos atributos cinemáticos do campo de onda. Com o empilhamento NMO foi obtido um mapa de distribuição de velocidades através da análise de velocidade no mapa de coerência semblance e, posteriormente, as seções empilhada e migrada no domínio do tempo e da profundidade. O método de empilhamento da superfície de reflexão comum (CRS) foi aplicado com o programa *crsstack-511* para obter as seções empilhada e migrada no domínio do tempo, e extrair os parâmetros do campo de onda, através de análise de coerência e da redundância contida nos dados sísmicos de multicobertura. O método de inversão niptomográfica de reflexão foi realizado por meio da aplicação do programa *niptomo*, que é uma implementação do método de inversão dos atributos cinemáticos da onda hipotética NIP, extraídos diretamente do empilhamento CRS, para se obter um modelo suavizado de velocidade e, posteriormente, uma seção migrada em profundidade. As seções migradas são do tipo Kirchhoff. As técnicas utilizadas seguem um fluxograma pré-estabelecido e realizado seguindo um arquivo *Makefile*, que funciona como um organizador de etapas. Estas etapas foram realizadas no ambiente de trabalho Linux e no sistema *Seismic Unix* da *Center for Wave Phenomena* (CWP) da *Colorado School of Mines*. Os resultados das três técnicas foram comparados com o objetivo de mostrar a evolução da qualidade visual das seções resultantes através da continuidade dos eventos traço-a-traço e da relação sinal/ruído, analisar diferenças e melhoras nas seções migradas visando uma melhor interpretação geológica e promover melhores condições de processamento e imageamento, buscando auxiliar possíveis perfurações com sucesso.

Palavras Chaves: Método de reflexão sísmica. Análise de velocidade sísmica. Empilhamento sísmico. Inversão sísmica. Imageamento sísmico. Migração sísmica.

ABSTRACT

This work was there on the study and processing, inversion and imaging in time and in depth of Marmousi seismic data, and of the real Jequitinhonha obtained in the Bahia state brazilian atlantic oriental continental platform. Were applied the NMO and CRS stack methods and the niptomographic inversion technique of the cinematic attributes of the wave field. With the NMO stack was obtained a velocity distribution map throughout the velocity analysis on the semblance coherence map and straight afterward the stacked and migrated sections in the domain of the time and depth. The stack method of the common reflection surface (CRS) was applied with the *crsstack-511* program to obtain the stacked and migrated sections in the time domain and to extract the field wave parameters throughout the coherence analysis and of the redundancy obtained on the seismic data of multi-device. The niptomographic inversion phenomena of reflection took place throughout the application of the *niptomo* program, which is an implementation of the inversion method of the cinematic attributes of the NIP hypothetical wave, extracted straight from the CRS stack, to obtain an smoothed velocity model, and subsequently, a migrated section in depth. The migrated sections are of the Kirchhoff kind. The techniques used follow a pre-determined and realized flowchart following a file “makefile”, that works as an stage organizer. These stages were realized in the Linux desktop and in the *Seismic Unix* system of the Center for Wave Phenomena (CWP) of Colorado School of Mines. The results of the three techniques were compared with the aim of illustrating the evolution of the visual quality of the reluctant sections throughout the events continuity trace-by-trace and the signal/noise relation, to analyze differences and improvements in the migrated sections expecting a better geologic interpretation and organize better terms of processing and imaging, trying to aid possible well succeed drillings.

Keywords: Seismic reflection method. Seismic velocity analysis. Seismic stack. Seismic inversion. Seismic imaging. Seismic migration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Diagrama de blocos do modelo convolucional simples em cascata com ruídos aditivos correspondentes, onde $f(t)$ representa o pulso fonte, $h(t)$ o meio, $h_2(t)$ o receptor, $h_3(t)$ a filtragem, r_1 , r_2 e r_3 os ruídos captados do meio e $g(x)$ o sismograma.	32
Figura 2.2 Modelo de camadas plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas entre dois semi-espacos (1D), caracterizadas pela velocidade v_i , densidade ρ_i , espessura z_i e um tempo de trânsito vertical simples $\Delta t_i = \frac{2z_i}{v_i}$. A fonte S e o receptor G estão separados de uma distância x , e x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor. A simetria é considerada como radial.	34
Figura 2.3 Geometria da trajetória do raio para a determinação do fator de divergência esférica, onde θ_s é o ângulo de partida do feixe de raios contidos em $\delta\theta_s$	35
Figura 2.4 Modelo 2D composto por interfaces refletoras plano-inclinadas de camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos. 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 emergência da onda; O_N é o ponto de reflexão da onda; e α_i e β_i são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo da interface.	36
Figura 2.5 Modelo 2D de camadas com interfaces curvas mostrando o raio central de referência (incidência normal, NIP), e uma trajetória CMP com afastamento $x = 2h$. A velocidade da camada é v_i e 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 emergência da onda; O_N é o ponto de reflexão da onda; e α_i e β_i são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo do refletor.	37
Figura 3.1 Fluxograma simplificado do processamento de dados sísmicos de reflexão convencional.	39
Figura 3.2 Correção NMO do tempo de trânsito: (a) Antes da correção; e (b) depois da correção NMO.	41

Figura 3.3 Família CMP com um único refletor (a). Caso onde foi aplicada a correção NMO para eliminar o efeito do afastamento (b). O caso de sobrecorreção e da subcorreção estão mostrados nas Figuras (c) e (d), respectivamente.	42
Figura 3.4 Estiramento do sinal (a) com período T para o (b) com período T'	43
Figura 3.5 Família CMP 2500 do Jequitinhonha L2140266 (esquerda) mostrando o mapa de coerência semblance (meio) e a respectiva correção NMO (direita), onde se observa os eventos de reflexão horizontalizados e o estiramento dos traços.	44
Figura 3.6 Operador de empilhamento CRS. <i>Parte inferior</i> : Modelo composto por duas camadas sobre um semi-espaco com um raio ZO de incidência normal (linha de cor vermelha). <i>Parte superior</i> : Superfície de cobertura múltipla (linhas de cor azul) correspondente aos tempos de trânsito hiperbólico dos eventos de reflexão da segunda interface. As linhas de cor vermelha definem a superfície de empilhamento CRS correspondendo ao ponto de reflexão R.	45
Figura 3.7 Física do modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano-horizontal com desenho dos atributos da frente de onda. (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	46
Figura 3.8 Fluxograma da solução do problema de otimização tri-paramétrica não-linear.	47
Figura 3.9 Ilustração do operador parcial de empilhamento CRS. <i>Parte inferior</i> : Modelo composto por duas camadas sobre um semi-espaco com um raio de afastamento nulo ou de incidência normal (linha de cor vermelha). <i>Parte superior</i> : Tempos de trânsito de afastamento nulo das reflexões normais da segunda interface (linha de cor azul). A linha de cor vermelha é a curva de empilhamento correspondente ao ponto de reflexão R calculado pela expressão (3.12).	49
Figura 3.10 Ilustração da função coerência para busca dos ângulos de emergência $\beta_0^{(i)}$ calculado ao longo de um operador linear na seção empilhada CMP para um ponto $P_0(x_0, t_0)$	50
Figura 3.11 Seleção de abertura em uma seção ZO. As regiões A, B e C representam três opções de abertura para o operador de empilhamento CRS. A seção é de afastamento-nulo onde se mostra 3 eventos de reflexão e a trajetória do operador $t_{\text{hip}}(x_m, h)$	53
Figura 3.12 Exemplo da Primeira Zona de Fresnel Projetada (PZFP) na superfície de observação em relação ao raio central. A extensão da ZFP serve para marcar a janela de observação. A ZFP foi calculada para dois raios NIPs: P_1 e P_2 . O traçamento cor de rosa	

apresenta a projeção direta da zona de Fresnel (ZF) limitada pelos raios normais. Segundo a equação (3.18), a cor azul mostra a ZF baseada no tempo de trânsito de acordo com a teoria do raio. Nas cores verde e vermelha tem-se as ZFs baseadas nas aproximações hiperbólica e parabólica, respectivamente. Foi usada a frequência dominante de $30Hz$. As linhas contínuas representam raios normais de ZO, e as linhas tracejadas representam raios difratados. 54

Figura 4.1 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 $\vec{r}$ 57

Figura 4.2 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 $z = 0$ 58

Figura 4.3 Modelo afastamento-nulo (esquerda) e do *refletor-em-explosão* (direita). Na primeira figura o campo de onda parte da superfície no instante $t = 0$, reflete em D e retorna a superfície onde é registrado no tempo t . Na segunda figura se tem outra forma de representar o afastamento-nulo, onde o campo de onda parte de um ponto da subsuperfície em $t = 0$ e é registrado na superfície no tempo $2t$. A velocidade do campo de onda no modelo afastamento-nulo (esquerda) é a metade da velocidade no modelo do *refletor-em-explosão* (direita). 59

Figura 4.4 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 $(x, y, z, t = \frac{z}{c})$ 60

Figura 4.5 Sistema de coordenadas do raio. Para uma fonte pontual S em 3D, as coordenadas do raio são dadas pelos ângulos γ_1 e γ_2 , e o argumento iconal $\tau = \tau(\vec{x})$ que especifica uma posição de um ponto sobre o raio. É possível usar o comprimento do arco S em vez do iconal $\tau = \tau(\vec{x})$ 62

Figura 4.6 Sistema de coordenadas centradas no raio. O vetor $\vec{e}_3$ é o raio unitário tangente em S , os vetores $\vec{e}_1$ e $\vec{e}_2$ estão localizados em um plano perpendicular ao raio em S . As coordenadas atuais são dadas por q_1 , q_2 e q_3 63

Figura 4.7 Os ângulos α_S e α_R são os ângulos de partida e de emergência dos dois ramos dos raios em S e R , respectivamente. O ângulo β é o mergulho do refletor, e α_{MR} é o ângulo de incidência do ramo do raio SM_R . Os ângulos podem ser definidos se M_R for um ponto de reflexão real em subsuperfície ou não e se faz uso da direção do ângulo médio definido pelos dois ramos dos raios. 64

Figura 4.8 Seção sísmica 3D, onde a parte superior da imagem mostra o domínio do tempo e a parte inferior o domínio da profundidade com um único refletor. A superfície de medida

é dada pelo plano $z = 0$. A seção sísmica é dada pelo volume de dados de todos os traços sísmicos dentro da abertura da migração (janela de integração) A e $t > 0$, ou seja, por todos os pontos $N(\xi, t)$. O ponto N_R representa um evento real ao longo do traço sísmico. No domínio da profundidade os eixos horizontais são denotados por x e z . A seção migrada é dada pelo volume de dados de todos os pontos $M(\vec{r}, z)$ dentro da abertura do refletor E e $z > 0$. O ponto $M_R(x, y, z)$ ilustra um ponto de reflexão real. 65

Figura 4.9 Tempo de trânsito τ_R da superfície 3D (superfície do tempo de trânsito da reflexão) para a geometria afastamento-comum, onde diversas superfícies de Huygens para os M pontos estão desenhadas. A migração Kirchhoff na profundidade é realizada pelo empilhamento ao longo de cada superfície de Huygens e apresentando o valor resultante no correspondente ponto difrator M na profundidade. A tangência entre a superfície de reflexão e a de difração define o refletor (atentar especialmente à curva de Huygens marcada na figura). Notar que o refletor só pode ser imageado na zona alvo, ou seja, dentro da malha de M pontos. 66

Figura 5.1 Ilustração 2D para definição do modelo e dos componentes dos dados para a inversão niptomográfica 2D. Os componentes $(\tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi)$ descrevem a curva do tempo de trânsito de segunda ordem τ associada com uma frente de onda emergente NIP, e que são as posições espaciais $(x, z)^{(NIP)}$ do NIP e o ângulo de partida $\theta^{(INI)}$ do raio normal, e a velocidade que é representada pelos coeficientes B-splines v_{jk} na equação (5.3). 71

Figura 5.2 Ilustração 2D de transformação do sistema de coordenadas locais $q_1, q_2, q_3 = S$ centradas no ponto final do raio para o sistema de coordenadas cartesianas globais ξ_1, ξ_2, ξ_3 relacionado à medida da superfície. 73

Figura 5.3 Figura 5.2 destacando a trajetória do raio do ponto A ao ponto B, onde é enfatizado o sistema de coordenadas centradas no raio $q_1, q_2, q_3 = S$ 73

Figura 5.4 Fluxograma do processo de inversão niptomográfica baseado nos atributos CRS. 83

Figura 6.1 Perfil geológico da bacia de Cuanza localizado em Quenguela Norte (Angola-África), utilizado para construção do modelo Marmousi. 84

Figura 6.2 Modelo de velocidade no tempo original de referência do Marmousi. 85

Figura 6.3 Ilustração da configuração geométrica (2D) do cabo flutuador para geração dos dados Marmousi. 86

Figura 6.4 Modelo de velocidade de referência do Marmousi no domínio do tempo (Figura 6.2) suavizado a 20 pontos. Comparar com a Figura 6.6. 90

Figura 6.5 Modelo de velocidade de referência do Marmousi em profundidade, obtido a partir da Figura 6.4 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$. Comparar com a Figura 6.8.	90
Figura 6.6 Mapa de distribuição de velocidades em tempo do Marmousi, suavizado à 20 pontos, obtido a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde cada CDP teve seu número de pontos marcados interpolado para o mesmo número de amostras. Observar o forte contraste de velocidade lateral.	91
Figura 6.7 Figura 6.6 representada por mapas de contorno, onde se observa a boa visibilidade dos diferentes contrastes de velocidade.	91
Figura 6.8 Mapa de distribuição de velocidades em profundidade do Marmousi, suavizado a 20 pontos, obtido a partir da Figura 6.6 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$	92
Figura 6.9 Figura 6.8 representada por mapas de contorno, onde se observa a boa visibilidade dos diferentes contrastes de velocidade.	92
Figura 6.10 Seção empilhada NMO do Marmousi no tempo obtida a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde se observa as falhas geológicas nos refletores e as difrações nas regiões centrais do modelo.	93
Figura 6.11 Seção migrada Kirchhoff no tempo, utilizando o modelo de velocidade de referência suavizado do Marmousi (Figura 6.4) sobre a seção empilhada NMO da Figura 6.10, onde se observa o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas e a recuperação de eventos em grandes profundidades. No entanto, se observa a presença de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”).	94
Figura 6.12 Seção migrada Kirchhoff no tempo, utilizando o modelo da Figura 6.6 sobre a seção empilhada NMO da Figura 6.10, onde se observa boa consistência com a migração da Figura 6.11, o que confirma a escolha da metodologia utilizada. Se observa que as difrações foram colapsadas, as falhas geológicas corrigidas e os eventos em grandes profundidades recuperados, contudo ainda há arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”).	95
Figura 6.13 Seção empilhada NMO do Marmousi (Figura 6.10) remapeada para profundidade, utilizando o modelo de velocidade em profundidade da Figura 6.8, através de uma interpolação linear e de uma extrapolação constante nos pontos marcados no mapa semblance para determinar as velocidades $v_{\text{INT}}(z)$ em intervalos de tempo não especificados.	96

Figura 6.14 Seção migrada Kirchhoff na profundidade utilizando o modelo da Figura 6.5 sobre a seção empilhada NMO (Figura 6.10), onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a recuperação de eventos em grandes profundidades e a ausência de arcos sobre os pontos difradores (“sorrisos”), demonstrando melhor qualidade da seção em relação à migração Kirchhoff no tempo. A comparação com a Figura 6.15 mostra melhor horizontalização dos eventos refletores em grandes profundidades. O parâmetro de abertura lateral usado foi 300m.	97
Figura 6.15 Seção migrada Kirchhoff na profundidade utilizando o modelo de velocidade da Figura 6.8 sobre a seção empilhada NMO (Figura 6.10), onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a recuperação de eventos em grandes profundidades e a ausência de arcos sobre os pontos difradores (“sorrisos”), demonstrando a melhor qualidade desta seção em relação à migração Kirchhoff no tempo. O parâmetro de abertura lateral usado foi 300m.	98
Figura 6.16 Fluxograma do empilhamento CRS aplicado ao modelo Marmousi.	99
Figura 6.17 Seção empilhada CRS otimizada do Marmousi, onde se observa grande evolução na qualidade visual da seção em relação a Figura 6.10 devido ao aumento da relação sinal/ruído, da melhor continuidade dos eventos refletores e da recuperação de eventos em grandes profundidades.	102
Figura 6.18 Seção empilhada CRS-migrada do Marmousi, onde se observa o colapso das difrações evidentes na Figura 6.17, a ausência de arcos acima dos pontos difradores (“sorrisos”) e o forte aspecto granuloso, principalmente nas regiões centrais e mais profundas da seção. Comparar com a Figura 6.12.	103
Figura 6.19 Migração Kirchhoff no tempo utilizando o modelo de velocidade semblance (Figura 6.6) e a seção empilhada CRS otimizada (Figura 6.17), onde se observa que as difrações foram colapsadas e que há muitos arcos acima dos pontos difradores (“sorrisos”). A comparação com a Figura 6.18 mostra uma maior qualidade visual em relação aos eventos refletores e a redução da granulação devido ao aumento da relação sinal/ruído.	104
Figura 6.20 Seção Coerência do empilhamento CRS otimizado do Marmousi usando o mapa semblance.	105
Figura 6.21 Seção Ângulo de Emergência β_0 (em graus) do empilhamento CRS do Marmousi.	105

Figura 6.22 Seção raio de curvatura R_N (em m^{-1}) do empilhamento CRS do Marmousi.	106
Figura 6.23 Seção raio de curvatura R_{NIP} (em m) do empilhamento CRS do Marmousi.	106
Figura 6.24 Dados de entrada e controle de qualidade da niptomografia. (a) Pontos que compõem os dados na inversão niptomográfica. (b) Erros residuais em τ_0 para 8 iterações. (c) Valores do componente $M_{NIP}^{(\xi)}$ usado na inversão niptomográfica. (d) Erros residuais em $M_{NIP}^{(\xi)}$ para 8 iterações. (e) Valores do componente do dado $p^{(\xi)}$ usado na inversão niptomográfica. (f) Erros residuais em $p^{(\xi)}$ para 8 iterações.	108
Figura 6.25 Gráfico da função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações do processo inverso. O total de iterações usadas para se obter o modelo de velocidade final foi 8, onde se observa que a função objeto se estabiliza a partir da iteração de número 6 e alcança seu mínimo valor em 0.459701.	110
Figura 6.26 Distribuição de velocidades inicial estimada pela atribuição de valores para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$, bem como da especificação dos fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados, dos pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , do gradiente de velocidade vertical constante k , da velocidade inicial v_0 e dos fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε .	111
Figura 6.27 Resultado da inversão depois de 8 iterações. Modelo de velocidade niptomográfico obtido pela inversão dos parâmetros dos dados de entrada, resultantes da marcação manual realizada na seção empilhada CRS otimizada do Marmousi e do modelo inicial da Figura 6.26. Comparar com a figura 6.6.	112
Figura 6.28 Figura 6.27 suavizada à 50 pontos na direção horizontal e 10 pontos na direção vertical.	112
Figura 6.29 Resultado da inversão depois de 8 iterações, onde os pontos em cruz são as 2276 marcações feitas na seção empilhada CRS sobrepostas ao modelo de velocidade em profundidade na figura 6.27.	113
Figura 6.30 Figura 6.29 suavizada à 50 pontos na direção horizontal e 10 pontos na direção vertical.	113
Figura 6.31 Resultado da inversão depois de 8 iterações mostrando o traçamento dos 2276 raios normais correspondendo aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)^{(NIP)}$ final.	114
Figura 6.32 Figura 6.31 suavizada à 50 pontos na direção horizontal e 10 pontos na direção vertical.	114

Figura 6.33 Mapa de velocidades semblance em profundidade reamostrado utilizado como entrada na niptomografia. A reamostragem foi de (750×574) para (42×19) pontos da malha pelo traçamento de raios. Observar a grande consistência com os modelos das Figuras 6.8 e 6.28, onde a variação dos valores de velocidade pelo paleta e o degradê confirmam a coerência da metodologia.	115
Figura 6.34 Função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações da inversão, utilizando o modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) como entrada. Foram executadas 6 iterações inversas não-lineares, onde se observa a grande diferença entre os valores da primeira e da última iteração, respectivamente iguais a 816.714 e 4.3547.	116
Figura 6.35 Resultado da inversão com 6 iterações da distribuição de velocidade niptomográfica do Marmousi, onde o modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) foi utilizado como modelo inicial. Consistentemente, as maiores velocidades estão nas partes mais profundas. A comparação mostra que o mapa da Figura 6.28 apresenta melhor qualidade visual devido sua maior suavidade e melhor distribuição dos valores de velocidade ao longo da seção. ...	117
Figura 6.36 Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades niptomográfico suavizado da Figura 6.28 que contém o acréscimo de $1500m$ aplicado em cada extremidade da malha para evitar efeitos de borda, limitando consideravelmente a análise das estruturas geológicas da seção.	119
Figura 6.37 Modelo de velocidade niptomográfico suavizado do Marmousi (Figura 6.28), utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre $3000m$ e $9200m$ de distância e entre 0 e $3000m$ de profundidade.	120
Figura 6.38 Modelo de velocidade niptomográfico suavizado do Marmousi (Figura 6.35), obtido a partir da aplicação do modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) como vínculo adicional de entrada, utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre $3000m$ e $9200m$ de distância e entre 0 e $3000m$ de profundidade.	120
Figura 6.39 Modelo de velocidade de referência suavizado do Marmousi, obtido a partir da Figura 6.5, utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre $3000m$ e $9200m$ de distância e entre 0 e $3000m$ de profundidade.	121

Figura 6.40 Modelo de velocidade semblance suavizado do Marmousi em profundidade (Figura 6.8), utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre 3000m e 9200m de distância e entre 0 e 3000m de profundidade.	121
Figura 6.41 Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades niptomográfico suavizado da Figura 6.37, onde se observa com melhor resolução a boa continuidade e horizontalização dos eventos refletos, a correção das falhas geológicas, o colapso das difrações, a recuperação de eventos na região central e a inexistência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”).	122
Figura 6.42 Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades niptomográfico da Figura 6.38, onde se observa a baixa qualidade visual da seção devido muitas regiões de baixa frequência, demonstrando que este modelo de velocidade, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 6.37, possui grandes limitações.	123
Figura 6.43 Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades de referência suavizado da Figura 6.39, onde se observa a boa consistência com a seção migrada da Figura 6.41, evidenciando a coerência da metodologia de inversão utilizada.	124
Figura 6.44 Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o modelo de velocidade semblance suavizado em profundidade (Figura 6.8), onde se observa a baixa qualidade visual da seção devido muitas regiões de baixa frequência, demonstrando que este modelo de velocidade, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 6.37, possui uma considerável limitação.	125
Figura 7.1 Mapa de localização da bacia do Jequitinhonha com ênfase na área de estudo (em amarelo), onde o fundo do mar varia de 50m à 3000m de profundidade.	126
Figura 7.2 Seção geológica esquemática da porção de água rasa da bacia do Jequitinhonha. É ilustrado a fossa tectônica resultante da distensão provocada pela fuga de sal para águas mais profundas a leste.	127
Figura 7.3 Mapa de localização da linha sísmica utilizada (em vermelho) da bacia do Jequitinhonha.	128

Figura 7.4 Fluxograma do pré-processamento da linha L2140266 por meio do método convencional.	129
Figura 7.5 Mapa de distribuição de velocidades suavizado em tempo da linha L2140266 do Jequitinhonha, obtido a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde cada CDP teve seu número de pontos marcados interpolado para o mesmo número de amostras.	131
Figura 7.6 Figura 7.5 representada por mapas de contorno para efeito de melhor visualização dos diferentes contrastes de velocidade.	131
Figura 7.7 Mapa de distribuição de velocidades suavizado em profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, obtido a partir da Figura 7.5 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$	132
Figura 7.8 Figura 7.7 representada por mapas de contorno para efeito de melhor visualização dos diferentes contrastes de velocidade.	132
Figura 7.9 Seção empilhada NMO no tempo da linha L2140266 do Jequitinhonha, realizada a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde se observa que a maior parte da informação registrada corresponde a eventos rasos, os eventos refletores possuem boa continuidade. No entanto se observam muitas difrações a medida que a profundidade aumenta.	133
Figura 7.10 Seção migrada Kirchhoff no tempo da linha L2140266 do Jequitinhonha sobre a seção empilhada NMO da Figura 7.9, utilizando o modelo de velocidade da Figura 7.5, onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas e a recuperação de vários eventos refletores em grandes profundidades. Contudo, se observam arcos sobre os pontos difradores (“sorrisos”) nas regiões mais profundas da seção.	134
Figura 7.11 Seção empilhada NMO (Figura 7.9) da linha L2140266 do Jequitinhonha remapeada para profundidade, utilizando o modelo de velocidade da Figura 7.7, através de uma interpolação linear e de uma extrapolação constante nos pontos marcados no mapa semblance para determinar as velocidades $v_{\text{INT}}(z)$ em intervalos temporais não especificados. Observar que a seção foi remapeada somente até a profundidade de 5250m.	135
Figura 7.12 Seção migrada Kirchhoff na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha sobre a seção empilhada NMO (Figura 7.9), utilizando o modelo de velocidade da Figura 7.7, onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos eventos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a recuperação de vários eventos refletores em grandes profundidades e a ausência de arcos sobre os pontos difradores (“sorrisos”), existentes na migração da Figura 7.10. Devido a falta	

de informação na seção geológica a profundidade considerada foi de 5500m. O parâmetro de abertura lateral da migração usado foi de 300m.	136
Figura 7.13 Etapas do fluxograma de empilhamento CRS aplicado à linha L2140266 do Jequitinhonha.	137
Figura 7.14 Seção empilhada CRS otimizada da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa a boa continuidade dos eventos refletores, e a grande quantidade de difrações, principalmente nas regiões mais profundas. Comparar com a Figura 7.9.	141
Figura 7.15 Seção empilhada CRS migrada da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a continuidade dos eventos refletores, a grande quantidade de granulações e a ausência de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”). Comparar com as Figuras 7.10 e 7.16.	142
Figura 7.16 Seção migrada Kirchhoff no tempo utilizando o modelo de velocidade semblance da Figura 7.5 e a seção empilhada CRS otimizada da Figura 7.14, onde se observam muitas difrações e a grande quantidade de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), principalmente para eventos em grandes profundidades, demonstrando a baixa qualidade da seção e a incoerência da metodologia. Comparar com as Figuras 7.10 e 7.15.	143
Figura 7.17 Seção coerência no empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha usando o mapa semblance.	144
Figura 7.18 Seção ângulo de emergência β_0 (em graus) do empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha.	144
Figura 7.19 Seção raio de curvatura R_N (em m^{-1}) do empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha.	145
Figura 7.20 Seção raio de curvatura R_{NIP} (em m) do empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha.	145
Figura 7.21 Dados de entrada da linha L2140266 do Jequitinhonha, e resíduos depois de 6 iterações. (a) Valores do componente τ_0 . (b) Erros residuais em τ_0 . (c) Valores do componente $M_{NIP}^{(\xi)}$. (d) Erros residuais em $M_{NIP}^{(\xi)}$. (e) Valores do componente $p^{(\xi)}$. (f) Erros residuais em $p^{(\xi)}$	147
Figura 7.22 Gráfico da função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações da inversão da linha L2140266. Foram executadas 6 iterações inversas não-lineares.	149

Figura 7.23 Distribuição de velocidades inicial estimada pela atribuição de valores para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$, bem como da especificação dos fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados, dos pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , do gradiente de velocidade vertical constante k , da velocidade inicial v_0 e dos fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε	150
Figura 7.24 Resultado da inversão depois de 6 iterações para a distribuição de velocidade niptomográfica da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa que o fundo oceânico está bem destacado e a região de maior velocidade corresponde as regiões mais profundas da bacia. A comparação com a figura 7.7 mostra a melhor qualidade do modelo niptomográfico devido sua maior suavidade e à definição das diferentes variações de velocidade.	151
Figura 7.25 Figura 7.24 suavizada à 20 pontos.	151
Figura 7.26 Resultado da inversão depois de 6 iterações mostrando os 2970 pontos de incidência normal sobrepostos ao modelo de velocidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa que as marcações na seção empilhada CRS otimizada foram feitas de forma homogênea nos eventos de reflexão primária.	152
Figura 7.27 Figura 7.26 suavizada à 20 pontos.	152
Figura 7.28 Resultado da inversão depois de 6 iterações mostrando o traçamento dos 2970 raios normais correspondendo aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)^{(\text{NIP})}$ final.	153
Figura 7.29 Figura 7.28 suavizada à 20 pontos.	153
Figura 7.30 Mapa de distribuição de velocidades semblance em profundidade reamostrado utilizado como entrada na niptomografia. A reamostragem foi de (1750×3274) para (22×8) pontos da malha para traçamento de raios. Observar a pequena consistência com o modelo da Figura 7.7, principalmente na direção vertical, que possui somente 8 colunas, tornando a distribuição dos 176 valores de velocidade limitada a apenas 22 por coluna. Observe-se a coerência da variação dos valores de velocidade pelo paleta e o degradê.	154
Figura 7.31 Função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações da inversão, utilizando o modelo de velocidade semblance reamostrado (Figura 7.30) como entrada. Foram executadas 12 iterações inversas não-lineares, onde se observa a diferença entre os valores da primeira (107.534) e da última (1.02175) iteração, e a convergência da função a partir da sexta iteração (1.75874).	155
Figura 7.32 Resultado da inversão com 12 iterações da distribuição de velocidade niptomográfica do Jequitinhonha, onde o modelo semblance reamostrado (Figura 7.30) foi utilizado como modelo inicial. Consistentemente, as maiores velocidades estão nas partes mais	

profundas. A comparação mostra que este mapa, em relação ao da Figura 7.7, apresenta melhor qualidade visual devido à suavização para se obter a malha da inversão.	156
Figura 7.33 Modelo de velocidade niptomográfico da Figura 7.25 utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para 42500m de distância e 7000m de profundidade.	159
Figura 7.34 Modelo de velocidade niptomográfico da Figura 7.30, obtido a partir da aplicação do modelo semblance reamostrado (Figura 7.30) como entrada, utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para 42500m de distância e 7000m de profundidade.	159
Figura 7.35 Modelo de velocidade semblance da Figura 7.7 utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde se observa a boa consistência com os modelos das Figuras 7.33 e 7.34. Os limites da malha possuem os mesmos valores das coordenadas da Figura 7.33.	160
Figura 7.36 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso das difrações nas regiões mais profundas da bacia e a ausência de arcos acima dos pontos de difração (“sorrisos”). O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 300m.	161
Figura 7.37 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, utilizando o modelo de velocidade semblance da Figura 7.34, onde se observam muitas regiões de baixa frequência, o colapso das difrações e a ausência de arcos acima dos pontos difradores (“sorrisos”). A seção mostra uma baixa qualidade visual em relação a Figura 7.36, demonstrando que o modelo de velocidade (Figura 7.34) utilizado para obter esta seção, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 7.33, possui grandes limitações. O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 300m.	162
Figura 7.38 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, utilizando o modelo de velocidade semblance (Figura 7.35), onde se observam muitas regiões de baixa frequência, o colapso das difrações e a ausência de arcos acima dos pontos difradores (“sorrisos”). A seção mostra uma baixa qualidade visual em relação a Figura 7.36, demonstrando que o modelo de velocidade (Figura 7.35) utilizado para obter esta seção, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 7.33, possui grandes limitações. O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 300m.	163
Figura 7.39 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa que as difrações não foram colapsadas (comparar com a	

Figura 7.36), e a seção não sofreu nenhuma alteração. O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 12.5m.	164
Figura 7.40 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso parcial das difrações (comparar com a Figura 7.39), porém ainda se observa a presença desses eventos indesejados (comparar com a Figura 7.36). O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 100m.	165
Figura 7.41 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso das difrações (comparar com a Figura 7.39), contudo surgem inúmeros arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”) nas regiões mais profundas (comparar com a Figura 7.36). O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 600m.	166
Figura 7.42 Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da Figura 7.36, linha L2140266 do Jequitinhonha, com as linhas de interpretação, onde os principais eventos de reflexão e as discontinuidades estão mostrados em linhas amarelas, as anticlinais e falhas geológicas em linhas verdes e o contato dos sedimentos/embasamentos em linhas pretas. Pode-se ver que a característica mais proeminente de difração no lado esquerdo foi colapsada, e o aparecimento de alguns eventos de reflexão. Ressaltar que a seção foi limitada a 5.5km de profundidade.	167

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
CDS	Superfície de Difração Comum
CMP	Ponto Médio Comum
DMO	Sobretudo de Mergulho
CDP	Datum em Profundidade Comum
CO	Afastamento Comum
CR	Receptor Comum
IFP	Instituto Francês de Petróleo
CRP	Ponto de Reflexão Comum
CRS	Superfície de Reflexão Comum
CS	Fonte Comum
N	Onda Normal
ZF	Zona de Fresnel
ZFP	Zona de Fresnel Projetada
NIP	Ponto de Incidência Normal
NMO	Correção do Sobretempo Normal
NMOC	Sobretudo Normal Corrigido
ZO	Afastamento Nulo
WIT	Tecnologia de Inversão da Onda
LSQR	Programa da Solução dos Mínimos Quadrados

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
$\mathbf{d}$	Vetor dos dados
$\mathbf{m}$	Vetor dos parâmetros do modelo
$\beta_j(x), \beta_k(z)$	Funções básicas B-spline
m	Grau da função B-spline
$S(\mathbf{m})$	Função objeto de minimização
$\mathbf{C}_D$	Matriz covariância dos dados
$\hat{\mathbf{F}}$	Matriz contendo as derivadas de Fréchet
$\mathbf{f}$	Operador não linear da modelagem direta pelo traçamento do raio
ε^2	Parâmetro de regularização da solução do problema inverso
n_{pontos}	Quantidade total de pontos da marcação
n_x	Número de colunas da malha da inversão tomográfica
n_z	Número de linhas da malha da inversão tomográfica
$\nabla_q v$	Gradiente de velocidade em coordenadas centradas no raio
$\hat{\mathbf{e}}^{(\text{NIP})}$	Vetor unitário relativo ao ponto do NIP
τ_0	Tempo de trânsito referente ao raio normal
$p^{(\xi)}$	Primeira derivada do tempo de trânsito
$\underline{P}_0$	Ponto de amostragem da seção ZO
$M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$	Segunda derivada do tempo de trânsito referente a frente de onda NIP
$M_{\text{N}}^{(\xi)}$	Segunda derivada do tempo de trânsito referente a frente de onda N
K_{N}	Curvatura da frente de onda N
K_{NIP}	Curvatura da frente de onda NIP
R_{N}	Raio de curvatura da onda N
R_{NIP}	Raio de curvatura da onda NIP
α	Ângulo de emergência vertical dos raios N e NIP
ξ_0	Posição de referência da emergência do raio normal
ξ_m	Coordenadas do ponto-médio entre a fonte-receptor
h	Distância do meio-afastamento fonte-receptor
t	Tempo de trânsito (tempo duplo)

v_{NMO}	Velocidade NMO
θ^{NIP}	Mergulho do refletor no ponto NIP
$(x, z)^{\text{NIP}}$	Coordenadas do ponto NIP
$v(x, z)$	Modelo de velocidade 2D
v_{RMS}	Velocidade média-quadrática
v_i	Velocidade na i -ésima camada
v_0	Velocidade próxima à superfície
v_{jk}	Coeficientes B-splines
t_0	Tempo de afastamento-nulo
δ_{ij}	Símbolo de Kronecker
$\tilde{H}$	Função Hamiltoniano
$\underline{x} = (x, y, z)$	Sistema de coordenadas ortogonais globais
$\underline{\xi} = (\xi, y, \zeta)$	Sistema de coordenadas ortogonais curvilíneas
v_p	Velocidade das ondas-P
v_s	Velocidade das ondas-S
C_{ijkl}	Tensor elástico
λ, μ	Parâmetros de Lamé
σ	Segmento ao longo do raio
$\underline{\mathbf{S}}$	Matriz do sistema do traçamento do raio paraxial
$\underline{\mathbf{\Pi}}^{(\zeta)}$	Matriz propagadora do raio em coordenadas ξ

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	30
2	MÉTODO SÍSMICO	32
2.1	MODELOS PARA A SUBSUPERFÍCIE	33
3	EMPILHAMENTO NMO E CRS	39
3.1	PROCESSO NMO	39
3.1.1	Análise de Velocidade	39
3.1.2	Correção NMO e Empilhamento	41
3.2	PROCESSO CRS-2D	44
3.2.1	Busca Automática dos Atributos CRS	46
3.2.2	Mergulhos Conflitantes	49
3.2.3	Migração CRS	54
4	MIGRAÇÃO	56
4.1	Migração Kirchhoff no Tempo	56
4.2	Migração Kirchhoff na Profundidade	60
5	NIPTOMOGRAFIA	69
5.1	DADOS DE AJUSTE E PARÂMETROS A RESOLVER	69
5.2	MODELO DIRETO	72
5.3	PROBLEMA INVERSO	74
5.4	MATRIZ TOMOGRÁFICA 2D	79
5.5	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE INVERSÃO	81
6	MODELO MARMOUSI	84
6.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS E AQUISIÇÃO	84

6.2	PROCESSAMENTO SÍSMICO	87
6.2.1	Empilhamento NMO	87
6.2.2	Empilhamento CRS-2D	99
6.3	NIPTOMOGRAFIA 2D	107
6.3.1	Modelo Inicial Linear	107
6.3.2	Modelo Inicial Semblance	115
6.4	MIGRAÇÃO	117
7	BACIA DO JEQUITINHONHA	126
7.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS E AQUISIÇÃO	126
7.2	PROCESSAMENTO SÍSMICO	129
7.2.1	Empilhamento NMO	129
7.2.2	Empilhamento CRS-2D	137
7.3	NIPTOMOGRAFIA 2D	146
7.3.1	Modelo Inicial Linear	146
7.3.2	Modelo Inicial Semblance	154
7.4	MIGRAÇÃO	157
8	CONCLUSÕES	168
	REFERÊNCIAS	172
	APÊNDICE A – REGULARIZAÇÃO DA MATRIZ TOMOGRÁFICA . .	177
	APÊNDICE B – DERIVADAS DE FRÉCHET	180
	APÊNDICE C – HARDWARE E SOFTWARE USADOS	187

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa o estudo sísmico de bacias sedimentares marinhas de geologia complexa, caracterizada pela presença de intensa variação litológica e estrutural, onde se encontra falhas subverticais, dobramentos, intrusões ígneas e salinas. Neste ambiente geológico, o empilhamento e a migração necessitam de métodos e modelos que admitam variação vertical e lateral de velocidade. O tema de variação lateral-vertical de velocidade tem sido contemplado no desenvolvimento de novas tecnologias na busca de se obter novas imagens da subsuperfície, e que são feito uso com base no sistema CWP/SU (COHEN; STOCKWELL, 2005).

Sendo assim, a metodologia organizada visa obter uma melhor imagem da subsuperfície em áreas de bacias sedimentares marinhas potenciais para a exploração de hidrocarbonetos. Para isto, iniciamos com o tratamento do dado sintético clássico Marmousi (VERSTEEG; GRAU, 1991), e depois com o dado real da plataforma continental oriental atlântica brasileira da bacia do Jequitinhonha, Bahia, adquirido pela PETROBRAS em 1985.

A intenção maior é contribuir para uma melhor condição de interpretação geológica para exploração de petróleo e gás, e poder auxiliar na locação de poços petrolíferos de sucesso. Além disso, no desenvolvimento dos projetos de pesquisa das Redes Cooperativas PETROBRAS/FINEP.

Foram aplicados três técnicas diferentes organizadas num fluxograma sistemático: empilhamentos NMO e CRS, e inversão niptomográfica dos atributos cinemáticos da frente de onda.

O método de empilhamento convencional NMO (1D) é baseado no modelo de camadas plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas, e numa distribuição de velocidades temporal obtido pela marcação de pares (v_{NMO}, t_0) no mapa de coerência semblance. O processo envolve a correção do sobretempo normal, e continua com o empilhamento, e a migração (YILMAZ, 1987).

O processo de empilhamento da superfície de reflexão comum (CRS) é uma extensão do método tradicional de empilhamento NMO para 2D, o que permite somar mais traços dispostos na configuração CMP. O método CRS utiliza uma equação de tempo de trânsito generalizada que depende da velocidade próxima à superfície do meio, e de outros três parâmetros

hipotéticos, para o caso 2D, e oito parâmetros para o caso 3D.

O empilhamento CRS é baseado em análise do critério de coerência semblance, onde a trajetória do tempo de trânsito pode ser representada por uma aproximação parabólica ou hiperbólica a partir da expansão em série de Taylor de segunda ordem para os raios paraxiais relacionados a um raio normal (SCHLEICHER et al., 1993b). A equação do tempo de trânsito depende das coordenadas de ponto-médio e meio-afastamento, (x_m, h) , e de três parâmetros (β_0, R_N, R_{NIP}) associados à frente de onda e ao seu raio normal para cada ponto de referência $P_0(x_0, t_0)$. A etapa fundamental do CRS consiste na estimativa dos três parâmetros a partir dos dados sísmicos de multi-cobertura, e associados a cada ponto amostrado da seção ZO simulada (JÄGER, 1999).

A inversão niptomográfica visa estabelecer um mapa de distribuição de velocidades com variação lateral, para servir ao imageamento em profundidade (DUVENECK, 2004). O problema inverso utiliza os atributos CRS através dos dados marcados na seção ZO empilhada. O problema é de ajuste de curva não-linear no sentido dos quadrados-mínimos entre as marcações dos parâmetros dos dados de entrada, $(\tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)$, e as correspondentes quantidades do modelo direto, $(x, z, \theta)^{(NIP)}$, associadas ao ponto NIP do modelo.

2 MÉTODO SÍSMICO

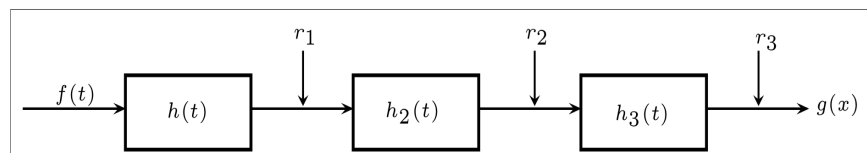
A sismologia de reflexão é o método de prospecção geofísica que apresenta maior resolução para analisar condições de risco exploratório de hidrocarbonetos (petróleo e gás natural) usando instrumentos de registro portáteis e fontes artificiais controladas. Esta técnica permite o imageamento da subsuperfície a partir de dados de multi-cobertura dependente do aumento da relação sinal/ruído das seções ZO, onde a atenuação da energia dos registros é um dos principais obstáculos. Os sismogramas obtidos ao longo de um perfil registram numa janela temporal-espacial discretizada vários tipos de ondas acústicas e/ou elásticas nos diversos receptores dispostos ao longo da linha sísmica.

A Figura 2.1 serve para mostrar o conjunto de etapas descritivas do método sísmico: (1) fonte (explosão, real, virtual, posição, acoplamento, raio efetivo); (2) meio (geologia sedimentar complexa, topografia, terrestre, marinho); (3) receptores (parâmetros da geometria, cabos, distribuição em linha, arranjo de geofones, eletrônica, sensores); (4) ruídos diversos (local, aleatório, determinístico, coerente, instrumental, geológico, fonte).

Outro importante conceito que deve ser sempre estabelecido nas descrições é quanto às dimensões da fonte, do meio e do levantamento. O problema geofísico-geológico é naturalmente 3D, que por conveniência são feitas aproximações em 2D e 2.5D. Outros efeitos, como as reflexões primárias, devem ser incluídos na componente determinística, além daqueles que são admitidos como parte da componente não-determinística, como ruídos locais, múltiplas, conversão P-SV e ondas de superfície.

Nesta dissertação apenas um esboço acerca do método sísmico de reflexão é apresentado, haja vista sua grande complexidade, e para maiores detalhes e informações nos referimos a Sheriff (1975), Claerbout (1976), Sheriff e Geldart (1982), e Duarte (2003).

Figura 2.1: Diagrama de blocos do modelo convolucional simples em cascata com ruídos aditivos correspondentes, onde $f(t)$ representa o pulso fonte, $h(t)$ o meio, $h_2(t)$ o receptor, $h_3(t)$ a filtragem, r_1 , r_2 e r_3 os ruídos captados do meio e $g(x)$ o sismograma.



Fonte: Adaptado de Leite (1998)

Para iniciar a descrição do método sísmico de reflexão, a modelagem requer a definição do arranjo geométrico da aquisição (ou simulação de dados sintéticos). Comumente se refere aos arranjos fonte-comum (CS), receptor-comum (CR), afastamento-comum (CO) e ponto-médio-comum (CMP).

2.1 MODELOS PARA A SUBSUPERFÍCIE

Os problemas geológicos devem ser descritos em 3D; no entanto, como uma primeira aproximação se considera uma descrição 2D para a geologia onde se admite o perfil geofísico perpendicularmente à direção de mergulho das camadas admitidas como constante. Nesta seção, os modelos são descritos em nível crescente de complexidade, como os de interfaces plano-horizontais, plano-inclinadas e com curvaturas.

Interfaces Plano-horizontais

O modelo clássico, formado por camadas plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas, contido no lançamento, é um dos mais simples e, ao mesmo tempo, mais importantes na sísmica de reflexão para representar partes de uma bacia sedimentar (Figura 2.2). Este modelo encontra grande aplicação na correção e no empilhamento NMO, onde está incluído a análise de velocidade via semblance (NEIDELL; TANER, 1971).

O tempo de trânsito relativo à trajetória na Figura 2.2 é dado pela equação paramétrica em função do parâmetro horizontal p do raio para a onda primária refletindo na interface n na forma:

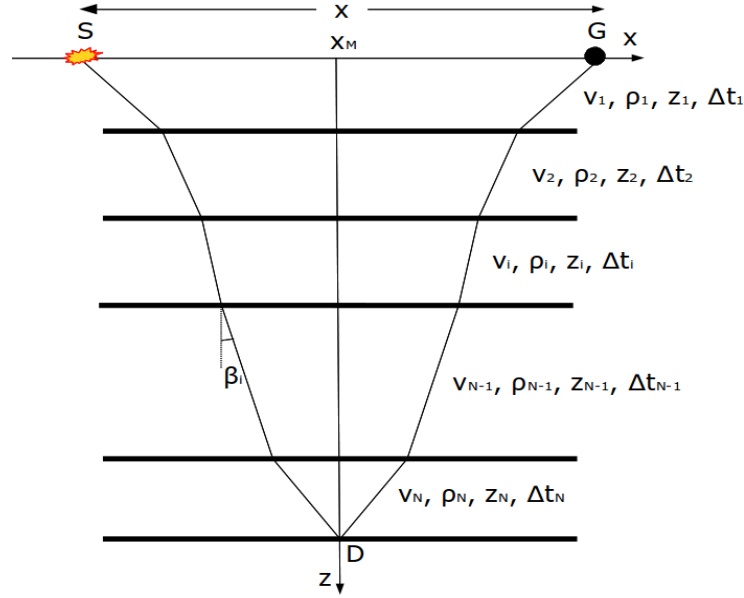
$$t(p) = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t_i}{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}}; \quad (2.1)$$

e a distância de emergência correspondente por:

$$x(p) = \sum_{i=1}^N \frac{v_i^2 \Delta t_i p}{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}}, \quad (2.2)$$

onde $p = \frac{\sin \beta_0}{v_0} = \frac{\sin \beta_i}{v_i}$ (HUBRAL; KREY, 1980), 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.

Figura 2.2: Modelo de camadas plano-horizontais, homogêneas e isotrópicas entre dois semi-espços (1D), caracterizadas pela velocidade v_i , densidade ρ_i , espessura z_i e um tempo de trânsito vertical simples $\Delta t_i = \frac{2z_i}{v_i}$. A fonte S e o receptor G estão separados de uma distância x , e x_m representa o ponto-médio entre fonte e receptor. A simetria é considerada como radial.



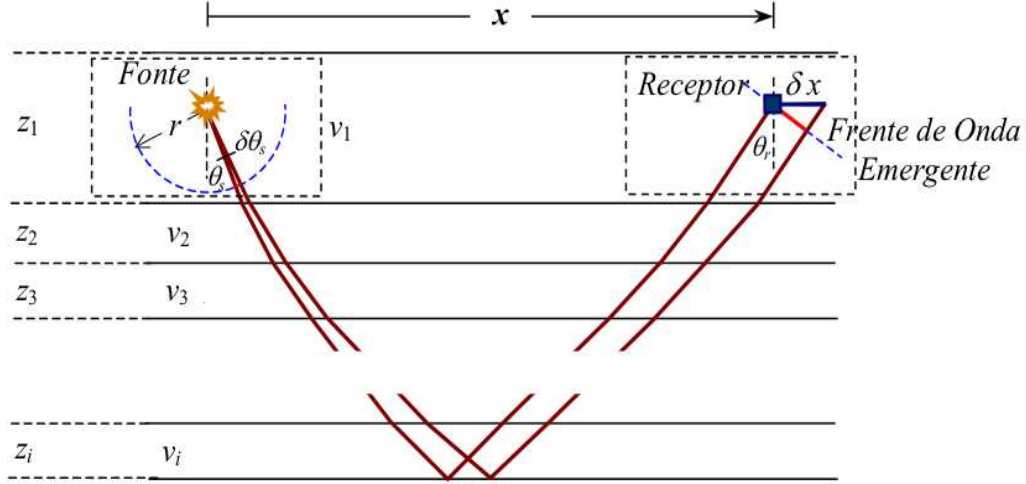
Fonte: Hubral e Krey (1980)

Na combinação $t(p)$ e $x(p)$, o raio de curvatura $R_0(x)$ da frente de onda correspondente (NEWMAN, 1973) é dado por:

$$R_0(x) = \frac{\sqrt{1 - v_i^2 p^2}}{v_i p} \left[x^2 + x \sum_{i=1}^{2N} z_i \left(\frac{p v_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.3)$$

onde z_i é a espessura da i -ésima camada. O argumento $R_0^{-1}(x)$ representa a divergência esférica, responsável pela atenuação geométrica do campo (Figura 2.3).

Figura 2.3: Geometria da trajetória do raio para a determinação do fator de divergência esférica, onde θ_s é o ângulo de partida do feixe de raios contidos em $\delta\theta_s$.



Fonte: Adaptado de Gutenberg (1936)

O tempo de trânsito desejável é para ser escrito na forma geral:

$$t = t(x; \mathbf{b}), \quad (2.4)$$

onde $\mathbf{b}$ representa o conjunto de parâmetros do modelo (SHERIFF; GELDART, 1985), e para o caso da Figura 2.2, a forma “hiperbólica” resulta, a partir das equações (2.1) e (2.2), na forma:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{1}{v_{\text{RMS}}^2} x^2}, \quad (2.5)$$

onde v_{RMS} é a velocidade média-quadrática:

$$v_{\text{RMS}}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i. \quad (2.6)$$

A velocidade média-quadrática v_{RMS} pode ser usada para a correção NMO (v_{NMO}), bem como no empilhamento v_E e na migração v_{MIG} . O raio de curvatura da frente de onda em afastamento-nulo pode ser calculado pelas leis de reflexão e transmissão, e escrito na forma:

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i. \quad (2.7)$$

Interfaces Plano-inclinadas

As camadas apresentam mergulho dentro da abertura do lanço da aquisição (Figura 2.4), e a equação do tempo de trânsito é dada por:

$$t^2(x) = \left[t_0 + \frac{\sin \beta_0}{v_1} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_1 R_0} (x_m - x_0)^2, \quad (2.8)$$

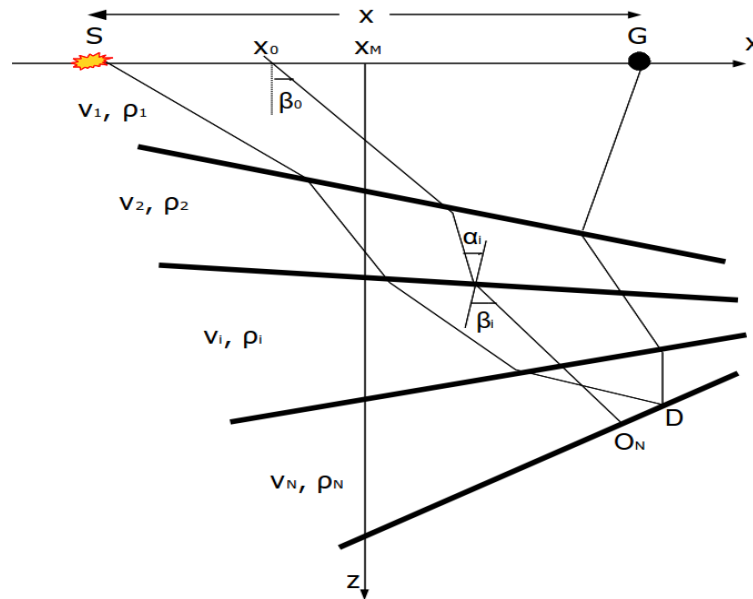
onde t_0 representa o tempo de trânsito normal, com o raio de curvatura R_0 da onda de trajetória $x_0 O_N$ dado por:

$$R_0 = \frac{1}{v_1} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i \prod_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right), \quad (2.9)$$

onde Δt_i é o tempo-duplo normal na camada i , e α_k e β_k são os ângulos verticais de incidência/transmissão (acima/abaixo) de cada interface (HUBRAL; KREY, 1980). A velocidade de sobretempo normal v_{NMO} é dada comparando as equações (2.5) e (2.8) na forma:

$$v_{\text{NMO}}^2 = \frac{2v_1 R_0}{t_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (2.10)$$

Figura 2.4: Modelo 2D composto por interfaces refletoras plano-inclinadas de camadas homogêneas, isotrópicas, posicionadas entre dois semi-espacos. 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 emergência da onda; O_N é o ponto de reflexão da onda; e α_i e β_i são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo da interface.

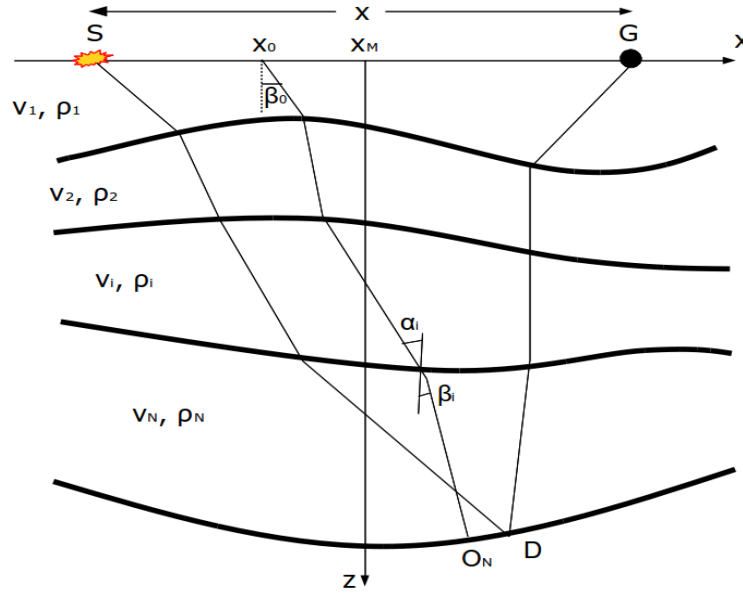


Fonte: Hubral e Krey (1980)

Interfaces Curvas

Este modelo é o mais próximo da realidade das estruturas em subsuperfície, e deve ser considerado dentro da abertura do lanço da aquisição (Figura 2.5). Sua descrição está diretamente relacionada ao empilhamento CRS.

Figura 2.5: Modelo 2D de camadas com interfaces curvas mostrando o raio central de referência (incidência normal, NIP), e uma trajetória CMP com afastamento $x = 2h$. A velocidade da camada é v_i e 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 emergência da onda; O_N é o ponto de reflexão da onda; e α_i e β_i são os ângulos de incidência vertical acima/abaixo do refletor.



Fonte: Hubral e Krey (1980)

O cálculo do tempo de trânsito utiliza os atributos da frente de onda com condições de pequeno afastamento fonte-receptor, raio de curvatura da frente de onda relativo ao ponto de emergência e $v_0 = v_1$ constante. O tempo de trânsito é apresentado em duas formas, a parabólica:

$$t(x_m, h) = t_0 + 2 \frac{\sin \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]; \quad (2.11)$$

e a hiperbólica:

$$t^2(x_m, h) = \left[t_0 + 2 \frac{\sin \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + 2t_0 \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right], \quad (2.12)$$

onde t_0 é o tempo-duplo normal, h o meio-afastamento fonte-receptor, v_0 a velocidade na superfície onde se localiza o ponto de referência $P_0(x_0, t_0)$, x_m a coordenada do ponto-

médio do afastamento fonte-receptor, x_0 o ponto de medida na superfície, e os parâmetros $(\beta_0, R_N, R_{\text{NIP}})$ são relativos à frente de onda relativa ao ponto $P_0(x_0, t_0)$ (Figura 3.7). A obtenção desta solução para o tempo de trânsito admite experimentos hipotéticos ((DURBAUM, 1954); (SHAH, 1973)). O primeiro experimento admite uma onda originada a partir de uma fonte pontual localizada no NIP com uma frente de onda inicialmente esférica (onda NIP). O segundo experimento admite uma onda originada ao redor do NIP, mas com uma frente de onda com curvatura inicial idêntica à curvatura do refletor, aproximada por uma esfera (ou círculo), denominada de onda N.

A expressão (2.12) pode ser reescrita para análise por partes voltadas às componentes de velocidade na forma (HERTWECK et al., 2007):

$$t^2(x_m, h) = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{\text{NMO}}^2} + 4t_0 \frac{\sin \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) + 4 \frac{\sin^2 \beta_0^2}{v_0^2} (x_m - x_0)^2 + \frac{(x_m - x_0)^2}{v_{\text{CMO}}^2}, \quad (2.13)$$

onde ficam definidas as velocidades v_{NMO} e v_{CMO} . Os dois primeiros termos de (2.13) são comparados ao caso de camadas plano-horizontais, de onde se obtém que:

$$v_{\text{NMO}}^2 = \frac{v_0 R_{\text{NIP}}}{2t_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (2.14)$$

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

$$v_{\text{CMO}}^2 = \frac{v_0 R_N}{2t_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (2.15)$$

Para casos especiais, iniciando com $R_{\text{NIP}} = \infty$, interpreta-se a equação (2.12) para o caso de refletores plano-inclinados, que com $\beta_0 = 0$ corresponde ao caso de camadas plano-horizontais (MANN et al., 2006).

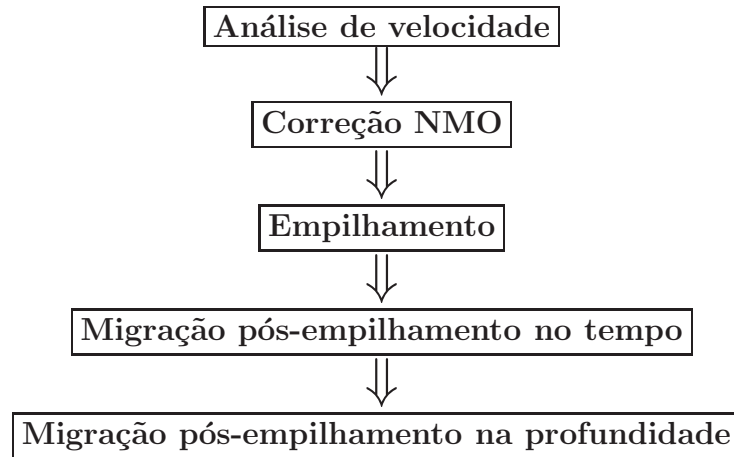
3 EMPILHAMENTO NMO E CRS

Com o objetivo maior do presente trabalho de obter imagens do subsolo a partir de dados sísmicos marinhos (Marmousi e Jequitinhonha) utilizando os processamentos NMO e CRS, conjuntamente com o auxílio da inversão niptomográfica, este capítulo consta da descrição das técnicas de empilhamento.

3.1 PROCESSO NMO

Nos dados sísmicos marinhos trabalhados foi aplicado o fluxograma da Figura 3.1, objetivando seções empilhada e migrada para compará-las as respectivas seções do empilhamento CRS e da niptomografia.

Figura 3.1: Fluxograma simplificado do processamento de dados sísmicos de reflexão convencional.



3.1.1 Análise de Velocidade

Há diversos tipos de velocidades sísmicas obtidas a partir das seções tempo-distância, dentre as quais se destacam as velocidades intervalar (v_{INT}), média-quadrática (v_{RMS}), de sobretempo normal (v_{NMO}), de empilhamento (v_E) e de migração (v_{MIG}). Todas apresentam aplicações, entretanto, no contexto desta análise, a velocidade de empilhamento é a de conceituação em foco, e algumas regras simples são seguidas para análise de velocidade no domínio do semblance:

- Há maior probabilidade da velocidade de empilhamento aumentar em função da profundidade em vez de diminuir;
- Reflexões sucessivas são consideradas separadas por um certo tempo de trânsito mínimo, $t_{\text{NMO}} = 100ms$;
- Valores de velocidades semblance são consideradas entre $1430m/s$ e $6000m/s$;
- As múltiplas devem ter velocidades menores do que as primárias;
- As marcações são consideradas como reflexões primárias.

A resolução na marcação da velocidade de empilhamento depende do campo registrado, e dos parâmetros de aquisição do dado, como tamanho do afastamento, cobertura, banda de frequências da aquisição e da razão sinal/ruído.

Mapa Semblance

Utilizando o critério de similaridade, Neidell e Taner (1971) introduziram o conceito de semblance $S(v_{\text{NMO}}, t_0; x_0)$, que é uma medida da coerência multicanal no intervalo $[0, 1]$, calculada para famílias CMP pela seguinte fórmula (SGUAZZERO; VESNAVER, 1987):

$$S(v_{\text{NMO}}, t_0; x_0) = \frac{\sum_{t=t_0-\delta t/2}^{t_0+\delta t/2} \left\{ \frac{1}{N_h} \sum_{h=h_0}^{\delta h} A[t(h, v_{\text{NMO}}); x_0] \right\}^2}{\sum_{t=t_0-\delta t/2}^{t_0+\delta t/2} \frac{1}{N_h} \sum_{h=h_0}^{\delta h} \{A[t(h, v_{\text{NMO}}); x_0]\}^2}, \quad (3.1)$$

onde os somatórios são realizados sobre h e t , $A[t(h, v_{\text{NMO}}); x_0]$ é a amplitude pré-processada dos traços com interpolação entre os pontos da malha na trajetória de empilhamento ao afastamento-nulo, com referência a um ponto no espaço-tempo $P_0(x_0, t_0)$, e para uma velocidade v_{NMO} que varia num intervalo prescrito. O somatório externo em t , $\sum_t$, é uma janela temporal δt relacionada ao comprimento do pulso-fonte-efetivo, e o somatório $\sum_h$ é executado na janela espacial do afastamento, δh . O valor da função semblance obedece à desigualdade: $0 \leq S(v_{\text{NMO}}, t_0; x_0) \leq 1$. N_h é o número de traços envolvidos na janela do afastamento h .

A marcação das velocidades de empilhamento corresponde a selecionar o máximo da função semblance, e esta marcação pode ser feita manualmente ou de forma automática

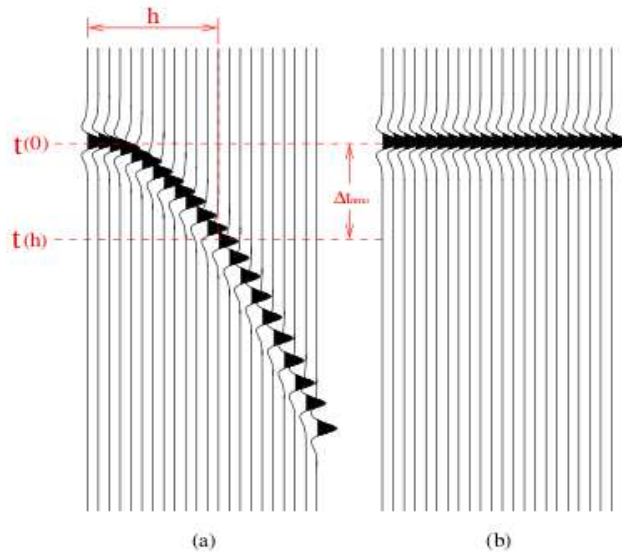
por métodos de otimização (TOLDI, 1989). Para o caso em que a subsuperfície seja modelada como estratificada horizontalmente, as reflexões a partir das interfaces são descritas por funções “hiperbólicas”, e a velocidade de empilhamento faz parte da função tempo de trânsito e controla a curvatura da hipérbole. Na seção CMP este modelo é satisfeito, e a função velocidade de empilhamento representa a velocidade média-quadrática (velocidade de integração), e pode ser usada para transformar as seções tempo-distância em profundidade-distância usando a transformada Dix-Durbaum (HUBRAL; KREY, 1980) e a teoria do raio imagem (CAMERON et al., 2007).

Os pares (v_{NMO}, t_0) devem ser marcados no mapa semblance (Figura 3.5; 2ª imagem) em conjunto com a análise dos eventos de reflexão. O modelo de velocidades NMO obtido é utilizado, primeiramente, no empilhamento e pode ser usado na migração no domínio do tempo.

3.1.2 Correção NMO e Empilhamento

O CMP corrigido de NMO deve mostrar refletores planos na situação normal. Devido a correção NMO, os traços são estirados, e o estiramento varia com a distância. Para diminuir o estiramento, especialmente nos eventos rasos, a área estirada é suprimida (silenciada) antes do empilhamento. Com a velocidade NMO estimada, o tempo de trânsito pode ser corrigido para remover a influência do afastamento conforme mostrado nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4.

Figura 3.2: Correção NMO do tempo de trânsito: (a) Antes da correção; e (b) depois da correção NMO.



Fonte: Yilmaz (1987)

A correção NMO, $\Delta t_{\text{NMO}}(h; t(0), v_{\text{NMO}})$, é expressa pela diferença entre $t(h)$ e $t(0)$ na forma:

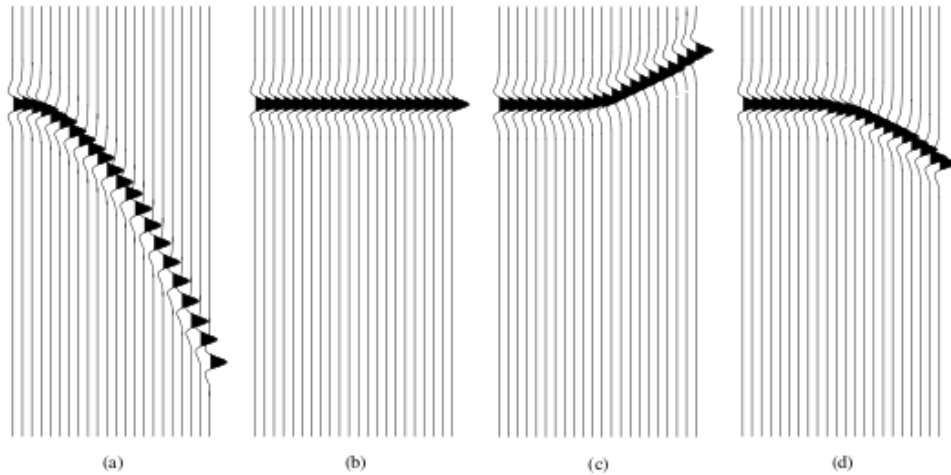
$$\Delta t_{\text{NMO}}(h; t(0), v_{\text{NMO}}) = t(h) - t(0), \quad (3.2)$$

e com a equação (2.5), é reescrita na forma (YILMAZ, 1987):

$$\Delta t_{\text{NMO}}(h; t(0), v_{\text{NMO}}) = t(0) \left\{ \left[1 + \left(\frac{2h}{t(0)v_{\text{NMO}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}. \quad (3.3)$$

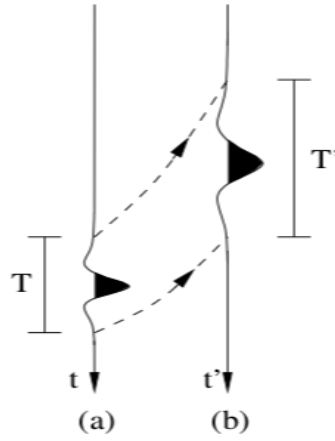
A correção NMO aumenta com h e diminui com v_{NMO} , ou seja, o sobretempo normal aumenta com o afastamento, diminui com a profundidade e é menor para grandes valores da velocidade. Se uma velocidade utilizada for maior do que a normal, os refletores se apresentam curvados para baixo, a hipérbole não é horizontalizada e ocorre a subcorreção. Se uma velocidade utilizada for menor do que a normal, os refletores se apresentam curvados para cima, a hipérbole não é horizontalizada e então ocorre a sobrecorreção (Figura 3.3).

Figura 3.3: Família CMP com um único refletor (a). Caso onde foi aplicada a correção NMO para eliminar o efeito do afastamento (b). O caso de sobrecorreção e da subcorreção estão mostrados nas Figuras (c) e (d), respectivamente.



Fonte: Yilmaz (1987)

Figura 3.4: Estiramento do sinal (a) com período T para o (b) com período T' .



Fonte: Yilmaz (1987)

A forma do pulso com um período dominante T é estirado de maneira que seu período muda para $T' > T$ após a correção NMO, e medido na forma:

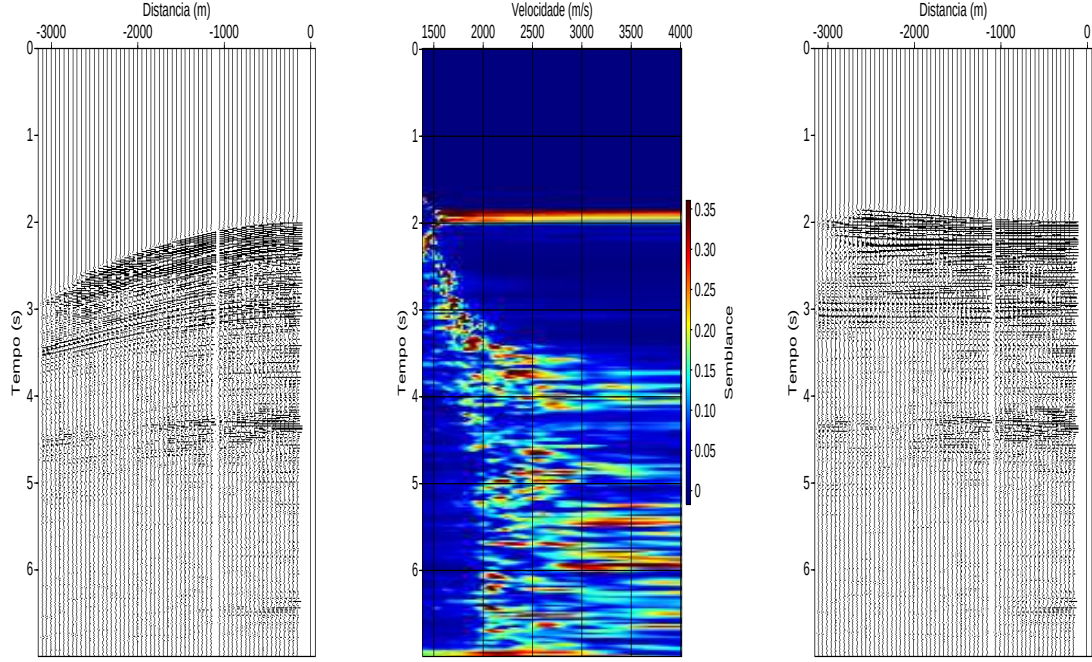
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_{\text{NMO}}}{t(0)}, \quad (3.4)$$

onde f é a frequência dominante, $\Delta f = f - f'$ a variação na frequência, Δt_{NMO} dado pela equação (3.3), resultando em:

$$\frac{\Delta f}{f} = \left[1 + \left(\frac{2h}{t(0)v_{\text{NMO}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1. \quad (3.5)$$

O silenciamento para evitar um ganho de baixa frequência é na seção $t - x$ cuja abertura aumenta com o tempo. Há uma dependência entre a relação sinal/ruído (S/R) e o silenciamento. A Figura 3.5 (3ª imagem) apresenta a família CMP 2500 da linha L2140266 da bacia do Jequitinhonha, após a correção NMO, onde se observa a horizontalização dos eventos de reflexão e o estiramento dos traços.

Figura 3.5: Família CMP 2500 do Jequitinhonha L2140266 (esquerda) mostrando o mapa de coerência semblance (meio) e a respectiva correção NMO (direita), onde se observa os eventos de reflexão horizontalizados e o estiramento dos traços.



No processamento convencional, os dados sísmicos são previamente organizados em famílias CMP. O empilhamento é realizado através de um operador temporal e a medida semblance para se obter um traço único na forma de uma média:

$$\bar{s}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \bar{u}_{i,t_i}, \quad (3.6)$$

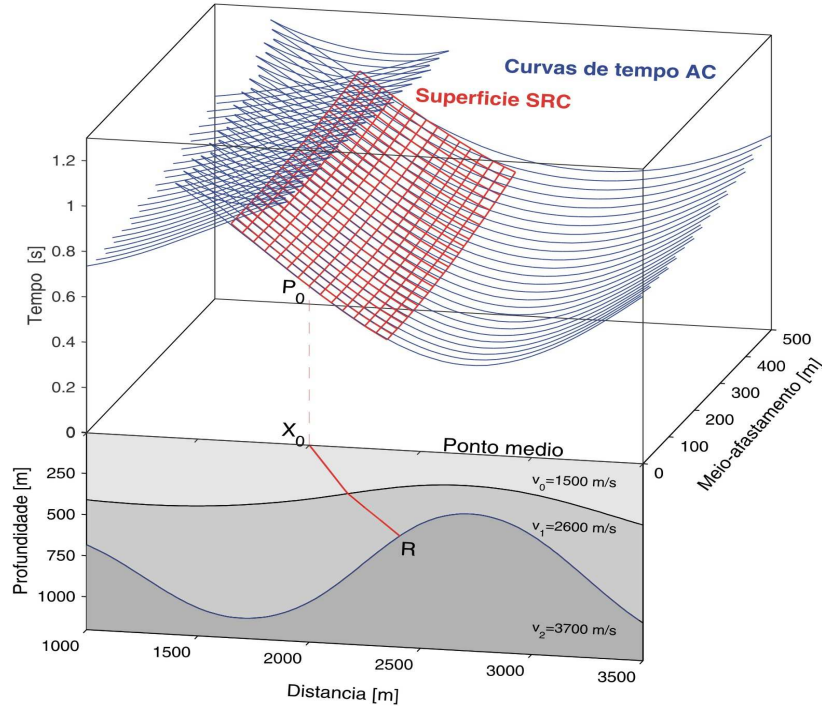
onde $\bar{s}_t$ representa a amplitude resultante média, $\bar{u}_{i,t_i}$ a amplitude no i -ésimo traço em tempo-duplo t_i , e N o número de traços somado em cada família CMP.

3.2 PROCESSO CRS-2D

Müller (1999), Jäger (1999), Mann (2002) e outros desenvolveram a tecnologia do empilhamento CRS. Neste caso estamos interessados em simular seções ZO, e tratamos de uma superfície de observação plana, com o operador (Figura 3.6) dependente de três parâmetros que definem a superfície de empilhamento e são determinados com base nos dados de multi-

cobertura por processos de busca automática baseado na análise de coerência semblance.

Figura 3.6: Operador de empilhamento CRS. *Parte inferior*: Modelo composto por duas camadas sobre um semi-espço com um raio ZO de incidência normal (linha de cor vermelha). *Parte superior*: Superfície de cobertura múltipla (linhas de cor azul) correspondente aos tempos de trânsito hiperbólico dos eventos de reflexão da segunda interface. As linhas de cor vermelha definem a superfície de empilhamento CRS correspondendo ao ponto de reflexão R.

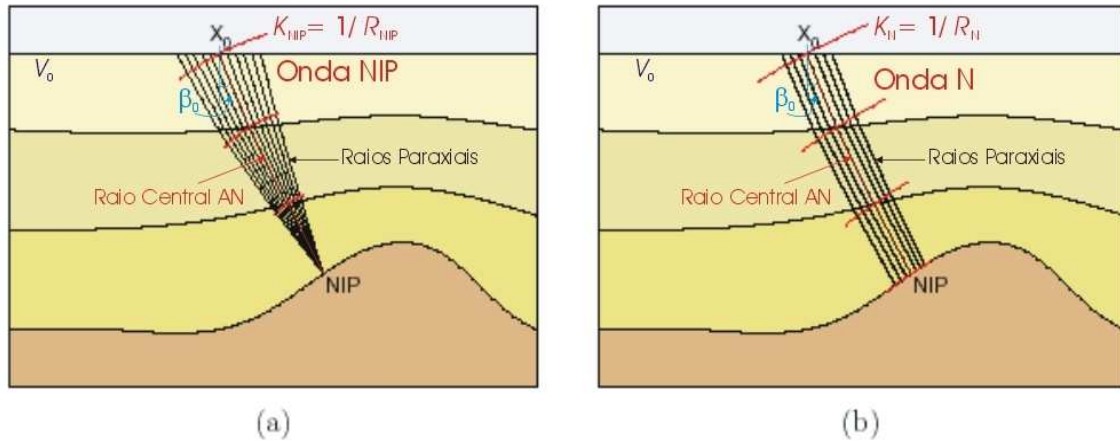


Fonte: Mann (2002)

O operador de empilhamento CRS (2.12) é obtido com base na teoria paraxial do raio (SCHLEICHER et al., 1997), e é função das coordenadas espaciais independentes x_m e h . Fisicamente, o operador resulta da aplicação do conceito das ondas hipotéticas NIP e N que se propagam ascendentemente a partir do refletor. 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. A representação dessas ondas é com relação ao raio central que simula a seção afastamento-nulo para o seu ponto de emergência $P_0(x_0, t_0)$, e associam-se a 3 atributos cinemáticos (Figura 3.7) que descrevem o operador de empilhamento: (1) o ângulo de emergência β_0 ; (2) o raio de curvatura R_N relacionado a onda N; (3) o raio de curvatura R_{NIP} relacionado a onda NIP. Esses atributos são os parâmetros da função polinomial que representa a superfície do operador e são objetos da estimativa usando métodos de otimização. 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.

Vários autores, entre eles Mann (2002), Duveneck (2004), Steht (2004), Koglin (2005), Baykulov e Gajewski (2007), e Heilmann (2007) apresentam exemplos de aplicações dos atributos CRS que vão além do simples empilhamento.

Figura 3.7: Física do modelo composto por camadas com interfaces curvas e superfície de aquisição plano-horizantal com desenho dos atributos da frente de onda. (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 .



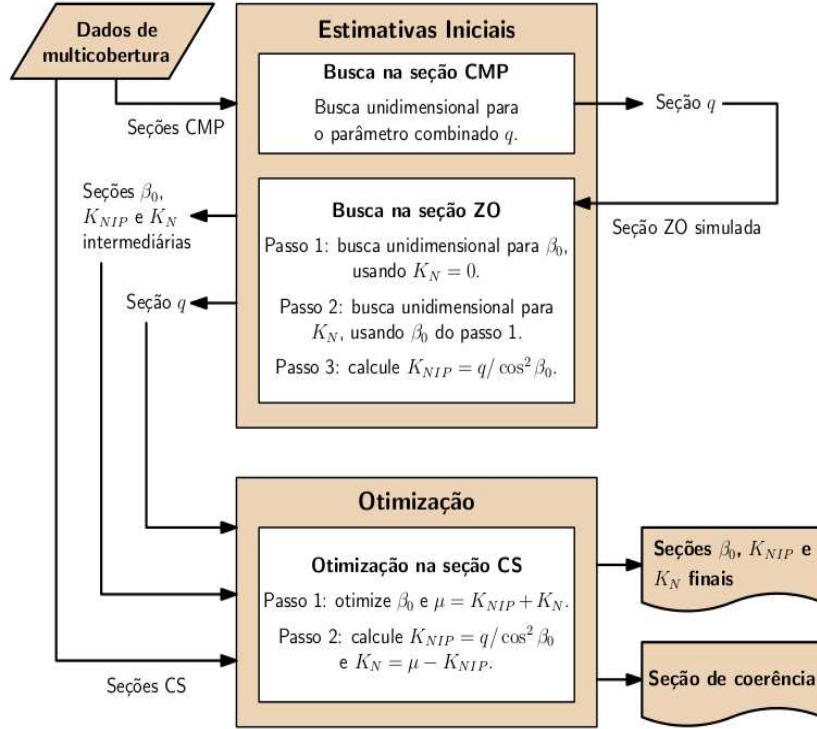
Fonte: Biloti (2001)

No processo de empilhamento são determinados para cada par $P_0(x_0, t_0)$ a terna “ótima” de parâmetros β_0 , R_{NIP} e R_N para que a equação (2.12) melhor ajuste aos eventos de reflexão no dado em multi-cobertura. Para quantificar o ajuste do operador ao evento observado e pré-empilhado se faz uso da medida de coerência semblance. O problema pode ser estabelecido como encontrar o máximo absoluto do valor da função coerência que depende de três independentes: β_0 , R_{NIP} e R_N . Além disso, como o problema é não-linear, a forma de encontrar o extremo global/local é a partir de um ponto de partida, que neste caso são parâmetros $(\beta_0, R_{NIP}, R_N)^{ini}$.

3.2.1 Busca Automática dos Atributos CRS

O problema de otimização tri-paramétrica não-linear é resolvido individualmente para cada amostra da seção ZO a ser simulada. A busca dos três parâmetros CRS pode ser realizada, em princípio, em uma única etapa, com busca simultânea em todos os pontos $P_0(x_0, t_0)$; no entanto, como se trata de um problema não-linear, Müller (1999) executou em quatro etapas como organizado sucintamente no fluxograma da Figura 3.8, e descrito a seguir.

Figura 3.8: Fluxograma da solução do problema de otimização tri-paramétrica não-linear.



Fonte: Biloti (2001)

Busca de $q(\beta_0, R_{NIP})$

Considerando $x_m = x_0$, a equação (2.12) se reduz à forma:

$$t_{\text{CMP,hip}}^2(x_m = x_0, h) = t_0^2 + \frac{2t_0}{v_0}qh^2, \quad (3.7)$$

onde o parâmetro q é dado por:

$$q = \frac{\cos^2 \beta_0}{R_{NIP}}, \quad (3.8)$$

que combina dois parâmetros CRS. Comparando a equação (3.7) com a equação do empilhamento convencional dada por:

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4}{v_{\text{EMP}}^2}h^2, \quad (3.9)$$

a velocidade de empilhamento v_{EMP} pode ser expressa na forma:

$$v_{\text{EMP}}^2 = \frac{2v_0}{t_0q} = \frac{2v_0R_{NIP}}{t_0 \cos^2 \beta_0}. \quad (3.10)$$

Esta particularização demonstra que a primeira etapa de busca dos atributos CRS utiliza seções CMP e é semelhante a análise de velocidade do empilhamento convencional. Para

cada seção CMP identificada em x_0 , e para cada t_0 , se determina numa malha semblance o valor de q que produz o maior valor de coerência baseado na equação (3.7).

Busca de β_0 e R_{NIP}

Para pequenos deslocamentos ao longo da coordenada ponto-médio (x_m), e devido ao parâmetro R_N possuir em geral valores grandes, ou seja, ($|R_N| \gg 1$), a contribuição da parcela de segunda ordem na equação (2.12) é desprezada, e simplificada para:

$$t_{\text{ZO,linear}}(x_m, h = 0) = t_0 + \frac{2\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0). \quad (3.11)$$

Desta forma, realiza-se uma busca uni-paramétrica para β_0 em uma pequena abertura ao redor de x_0 . Com β_0 e o parâmetro combinado q determinados, calcula-se o R_{NIP} por (3.8).

Busca de R_N

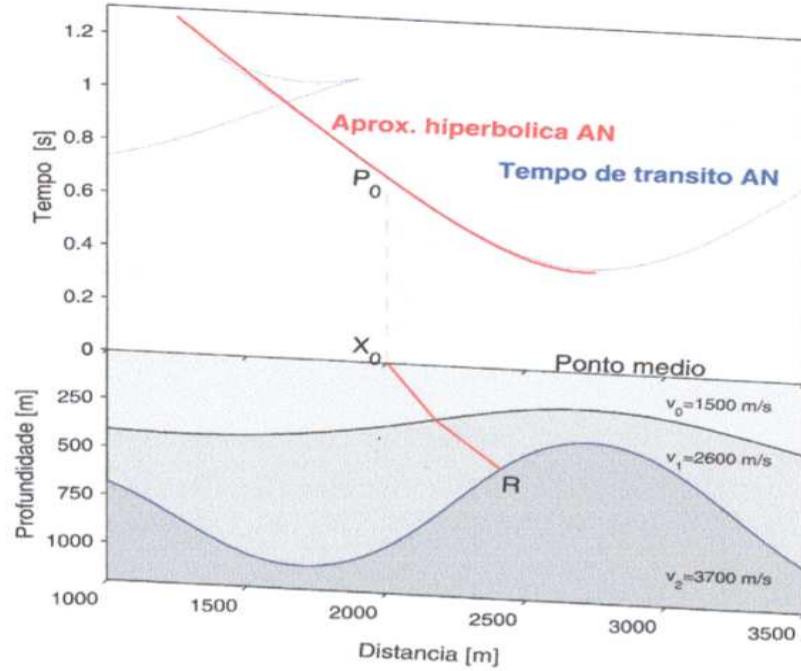
Com β_0 e R_{NIP} estimados, e aplicando a condição $h = 0$ na expressão (2.12), se obtém a aproximação hiperbólica para a configuração ZO, dada por:

$$t_{\text{ZO,hip}}^2(x_m, h = 0) = \left[t_0 + \frac{2\text{sen } \beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N}(x_m - x_0)^2, \quad (3.12)$$

tornando-a dependente apenas dos atributos β_0 e R_N no domínio x_m . As trajetórias de empilhamento definidas pela equação (3.12), e confinadas ao domínio (x_m, t_0) , aproximam aos tempos de trânsito ZO das reflexões normais.

Como ilustração, na parte superior da Figura 3.9 mostra-se a curva de empilhamento de cor vermelha calculada pela expressão (3.12) para o ponto P_0 correspondente à reflexão primária em R . A curva de cor azul representa os tempos de trânsito de afastamento-nulo das reflexões primárias normais do segundo refletor mostrados na parte inferior da mesma figura.

Figura 3.9: Ilustração do operador parcial de empilhamento CRS. *Parte inferior*: Modelo composto por duas camadas sobre um semi-espço com um raio de afastamento nulo ou de incidência normal (linha de cor vermelha). *Parte superior*: Tempos de trânsito de afastamento nulo das reflexões normais da segunda interface (linha de cor azul). A linha de cor vermelha é a curva de empilhamento correspondente ao ponto de reflexão R calculado pela expressão (3.12).



Fonte: Mann (2002)

Empilhamento inicial

Determinados os valores iniciais dos parâmetros $(\beta_0, R_N, R_{NIP})^{ini}$ é realizado o empilhamento inicial de acordo com a equação (2.12), para acompanhar a evolução no processo de busca dos parâmetros.

Busca final por otimização

Para se estimar simultaneamente os três parâmetros CRS no sentido do semblance se usa o operador (2.12), o algoritmo de otimização do tipo poliedro flexível (NELDER; MEAD, 1965) e os parâmetros CRS iniciais $(\beta_0, R_N, R_{NIP})^{ini}$. O resultado $(\beta_0, R_N, R_{NIP})^{opt}$ é apresentado na forma de seções β_0 , R_{NIP} e R_N .

3.2.2 Mergulhos Conflitantes

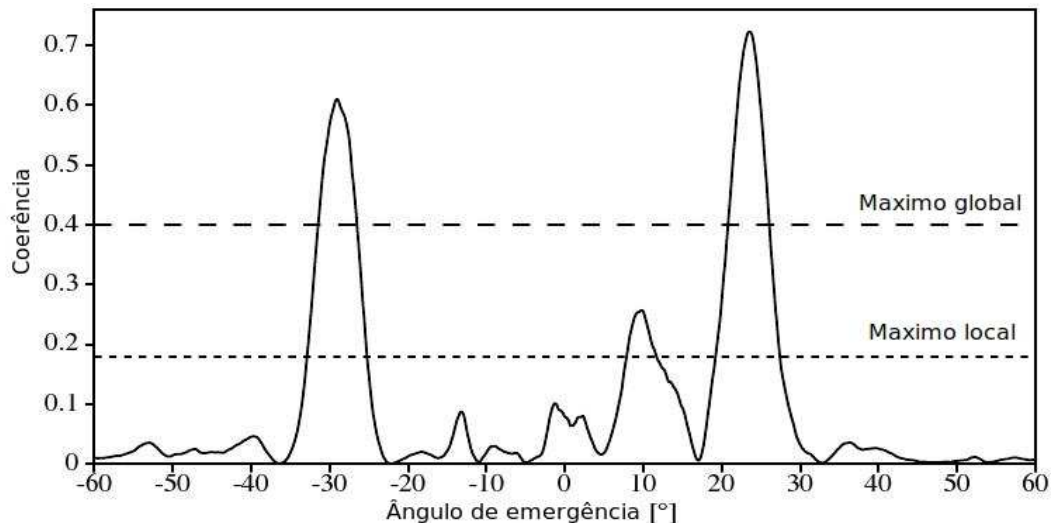
Espera-se que uma seção empilhada ou migrada no domínio $t - x$, apresente eventos que se cruzam caracterizados por seus mergulhos conflitantes. O mergulho conflitante permanece

como uma tarefa para uma apresentação adequada deste efeito em seções sísmicas, onde no cruzamento se deve mostrar a continuidade dos eventos principais e secundários, e não uma lacuna vazia ou descontinuidades dos eventos. Os eventos são marcados no domínio do semblance, e o evento principal é definido como relacionado à sua máxima coerência global ao longo de uma janela no mapa $t_0 - v_{\text{RMS}}$, e os eventos que se cruzam são tomados como uma máxima coerência local secundária localizada depois de uma distância mínima do evento principal. Mann (2002) lida com esta situação determinando a máxima coerência adicional no empilhamento ZO linear, e apresenta uma estratégia para considerar valores diferentes para $R_N^{(i)}$ e $\beta_0^{(i)}$, ($i = 1, 2, \dots, n$), onde n é o número de buscas consideradas para eventos que se cruzam para cada amostra ZO, e a busca para $R_{\text{NIP}}^{(i)}$ é realizada nos dados pré-empilhados de tiro-comum e receptor-comum.

Para detectar os máximos relevantes referentes a mergulhos conflitantes, Mann (2001a) e Mann (2001b) aplicou uma série de critérios de aceitação para os máximos de coerência encontrados (Figura 3.10):

- O máximo global de coerência tem que exceder um certo valor mínimo inicial.
- Os máximos locais de coerência devem exceder um certo valor em relação ao máximo global.
- Os máximos devem estar claramente separados por uma distância mínima de mesma coerência.

Figura 3.10: Ilustração da função coerência para busca dos ângulos de emergência $\beta_0^{(i)}$ calculado ao longo de um operador linear na seção empilhada CMP para um ponto $P_0(x_0, t_0)$.



Fonte: Mann (2002)

Por outro lado, Soleimani et al. (2009) atacam o problema de mergulho conflitante com uma abordagem considerando um operador de empilhamento chamado CDS (superfície de difração comum), onde $R_{\text{NIP}} = R_{\text{N}}$ são substituídos por R_{CDS} na equação (2.12) na forma:

$$t_{\text{hip}}(x_m, h) = \sqrt{\left[t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0}(x_m - x_0)\right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{CDS}}} [(x_m - x_0)^2 + h^2]}; \quad (3.13)$$

onde β_0 é procurado para uma malha de valores na busca do empilhamento ZO.

Estimativa do R_{NIP}

Os ângulos $\beta_0^{(i)}$ e os raios $R_{\text{N}}^{(i)}$ associados aos eventos (i) contribuem para cada posição no domínio ZO. No entanto, os raios $R_{\text{NIP}}^{(i)}$ não podem ser calculados a partir do parâmetro combinado q e dos ângulos de emergência $\beta_0^{(i)}$; isto é, um conjunto de ângulos está disponível, mas apenas um único (e possivelmente inexato) parâmetro combinado q é fornecido pelo empilhamento CMP automático.

Para solucionar esta ambigüidade do mergulho conflitante, Mann (2001a) e Mann (2001b) propõe introduzir uma busca adicional para os raios de curvatura $R_{\text{NIP}}^{(i)}$ em um subconjunto diferente do volume de dados pré-empilhados, onde nem o ZO nem a configuração CMP se adequam para resolver esta ambigüidade. O subconjunto usado foi o CO, onde $x_m - x_0 = h$, que substituído na equação (2.12) fornece o tempo de trânsito de $t_{\text{CS}}(h)$ dado por:

$$t_{\text{CS,hip}}^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0}(x_m - x_0)\right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0 h^2}{v_0} \left(\frac{1}{R_{\text{C}}}\right), \quad (3.14)$$

onde se escreve

$$\left(\frac{1}{R_{\text{C}}}\right) = \left(\frac{1}{R_{\text{N}}} + \frac{1}{R_{\text{NIP}}}\right), \quad (3.15)$$

sendo R_{C} denominado de raio de curvatura combinado de R_{NIP} e R_{N} . Como os ângulos de emergência $\beta_0^{(i)}$ são conhecidos na busca de β_0 e R_{NIP} da seção empilhada, a busca adicional depende do parâmetro R_{C} .

Para cada valor de ângulo de emergência $\beta_0^{(i)}$, o parâmetro $R_{\text{C}}^{(i)}$ correspondente é determinado através de uma busca uni-paramétrica realizada com a equação (3.14). O parâmetro $R_{\text{NIP}}^{(i)}$ é obtido através da equação (3.15), onde $R_{\text{N}}^{(i)}$ é estimado na etapa de busca de $R_{\text{N}}^{(i)}$ na seção empilhada correspondente ao parâmetro $\beta_0^{(i)}$.

É importante ressaltar que a equação (3.14) contém os parâmetros dos dados de entrada, utilizados na metodologia de inversão niptomográfica (capítulos 5, 6 e 7), relacionados aos eventos de reflexão primária na seção empilhada CRS e que se relacionam às quantidades

que descrevem as frentes da onda N e NIP na forma (DUVENECK, 2004):

$$\begin{aligned} p^{(\xi)} &= \frac{\sin \beta_0}{v_0}, \\ M_N^{(\xi)} &= \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0 R_N}, \\ M_{NIP}^{(\xi)} &= \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}}. \end{aligned} \tag{3.16}$$

Aberturas

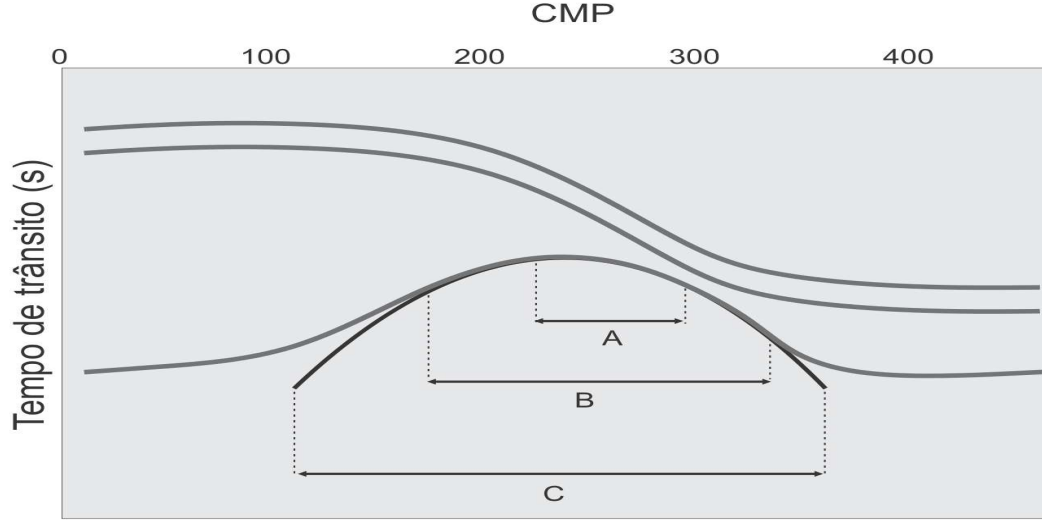
O operador CRS é uma aproximação em série de Taylor de segunda ordem em h e $|x_m - x_0|$ do tempo de trânsito de uma reflexão em termos do ponto-médio x_m e meio-afastamento h . Mas essa aproximação fornece bons resultados para pequenos afastamentos. Como não se tem um modelo de velocidade, é difícil quantificar o erro cometido na aproximação em função do tamanho dos deslocamentos $x_m - x_0$ e h . A superfície definida por este operador deve ser, até segunda ordem, tangente à superfície do correspondente evento de reflexão no volume de dados.

A abertura ótima do empilhamento pode ser considerada como a região onde a curva de tempo de trânsito do evento de reflexão e a do operador sejam tangentes. Esta tangência está relacionada à frequência dominante do sinal sísmico, uma vez que esta determina a largura do pulso de entrada. Uma abertura muito pequena (Figura 3.11, região A) pode resultar na perda de traços adequados ao empilhamento. Por outro lado, uma abertura muito grande (Figura 3.11, região C) pode implicar no empilhamento de traços irrelevantes ao sinal. Para escolher adequadamente a abertura de empilhamento (Figura 3.11, região B) é importante na prática a seleção de aberturas como um processo iterativo (MANN, 2002).

Nos algoritmos de busca dos parâmetros CRS, a abertura é normalmente representada como uma elipse cuja área varia com o tempo, e seus semi-eixos principais estão nas direções $x = (x_m - x_0)$ e de h .

A informação registrada nos receptores é função das estruturas geológicas em subsuperfície. Hiltermann (1982) e Lindsey (1989) descrevem que a principal contribuição a um evento registrado está contida na região do refletor denominada *Primeira Zona de Fresnel*, que deve ser distinguida com relação ao afastamento, e cujo tamanho depende das propriedades geométricas (mergulho e curvatura) do refletor na vizinhança do ponto de reflexão, da velocidade do meio acima do refletor e do conteúdo de frequência do sinal.

Figura 3.11: Seleção de abertura em uma seção ZO. As regiões A, B e C representam três opções de abertura para o operador de empilhamento CRS. A seção é de afastamento-nulo onde se mostra 3 eventos de reflexão e a trajetória do operador $t_{\text{hip}}(x_m, h)$.



Fonte: Adaptado de Gamboa (2007)

O conceito da Zona de Fresnel (ZF) está diretamente relacionado à resolução horizontal em subsuperfície, e o raio da Primeira Zona de Fresnel (PZF) é dado por:

$$R_1 = \left(\frac{1}{2} \lambda h_0 \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} v \left(\frac{t}{f} \right) \frac{1}{2}, \quad (3.17)$$

onde h_0 representa a profundidade do refletor, t o tempo de trânsito vertical, v a velocidade do meio e f é a frequência temporal monocromática.

A Primeira Zona de Fresnel ao redor de um ponto de reflexão x_R é formada por todos os pontos x_P para os quais o tempo de trânsito da difração t_d , e o tempo de trânsito da reflexão t_R ao longo do raio central satisfazem a seguinte condição:

$$|t_d(x_P) - t_R(x_R)| \leq \frac{T}{2}, \quad (3.18)$$

onde T denota o período do sinal monofrequência da fonte.

Primeira zona de Fresnel projetada

A Primeira Zona de Fresnel definida na profundidade tem a correspondente extensão na superfície de medição denominada *Primeira Zona de Fresnel Projetada* (PZFP) (Figura 5.4), onde a principal contribuição vinda de um refletor na profundidade deve ser contida dentro

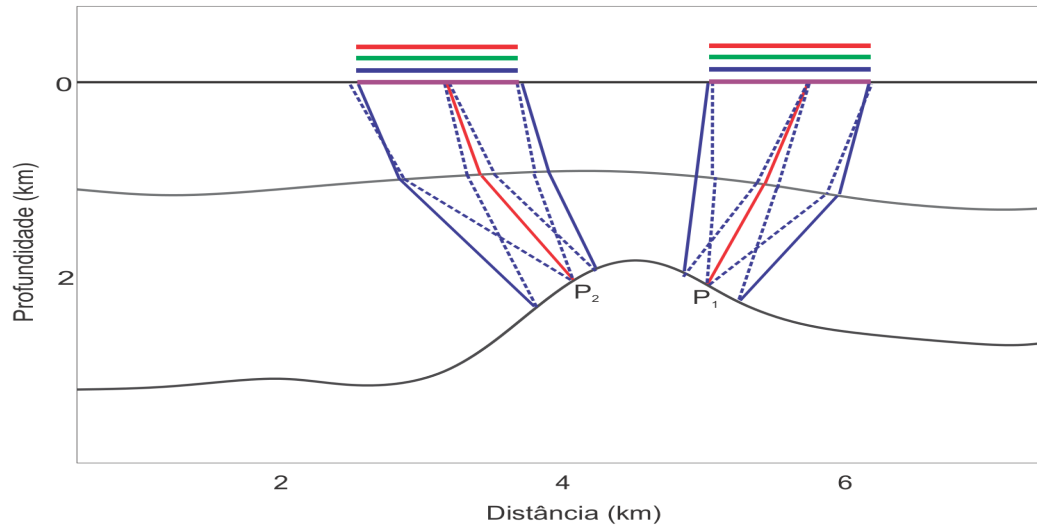
desta zona, e Hubral et al. (1993) e Mann (2002) propõem a PZFP como a abertura mais adequada para o empilhamento.

A PZFP, W_F , para o caso de uma seção ZO pode ser aproximada em termos dos atributos CRS através da equação:

$$\frac{W_F}{2} = |x_m - x_0| = \frac{1}{\cos \beta_0} \sqrt{\frac{v_0 T}{2 \left| \frac{1}{R_{NIP}} - \frac{1}{R_N} \right|}}, \quad (3.19)$$

onde os três atributos CRS entram no cálculo que admite um modelo de velocidade uniforme acima do ponto de reflexão.

Figura 3.12: Exemplo da Primeira Zona de Fresnel Projetada (PZFP) na superfície de observação em relação ao raio central. A extensão da ZFP serve para marcar a janela de observação. A ZFP foi calculada para dois raios NIPs: P_1 e P_2 . O traçamento cor de rosa apresenta a projeção direta da zona de Fresnel (ZF) limitada pelos raios normais. Segundo a equação (3.18), a cor azul mostra a ZF baseada no tempo de trânsito de acordo com a teoria do raio. Nas cores verde e vermelha tem-se as ZFs baseadas nas aproximações hiperbólica e parabólica, respectivamente. Foi usada a frequência dominante de $30Hz$. As linhas contínuas representam raios normais de ZO, e as linhas tracejadas representam raios difratados.



Fonte: Adaptado de Mann (2002)

3.2.3 Migração CRS

Um subproduto natural do processo CRS é a migração CRS no tempo, com características do tipo Kirchhoff, e consta basicamente de um mapeamento. Quando um refletor se reduz a um ponto difrator, a onda N tem seu raio R_N reduzido ao correspondente da onda NIP

(R_{NIP}) , ou seja, $R_{\text{N}} \rightarrow R_{\text{NIP}}$. Conseqüentemente o operador da migração no tempo se constitui como um caso particular do operador CRS (2.12) na forma:

$$t_D^2(x_m, h) = \left[t_0 + 2 \frac{\sin \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{\text{NIP}}} [(x_m - x_0)^2 + h^2]. \quad (3.20)$$

Embora a equação (2.12) seja adequada aos eventos de reflexão, a resposta aproximada à difração pode ser usada como uma alternativa ao operador de empilhamento para simular uma seção ZO. Mann et al. (2000) apresenta uma aplicação onde o ápice da resposta aproximada da difração também oferece uma localização aproximada da imagem de uma migração no tempo. Devido a simetria dos eixos, o ápice deste operador hiperbólico é localizado em $h = 0$, e este ponto é encontrado em $\frac{\partial t_D(x_m, h=0)}{\partial x_m=0}$ que leva a encontrar as coordenadas do ápice, $(x_{\text{ápice}}, t_{\text{ápice}})$, na forma:

$$x_{\text{ápice}} = x_0 - \frac{R_{\text{NIP}} t_0 v_0 \sin \beta_0}{2 R_{\text{NIP}} \sin^2 \beta_0 + t_0 v_0 \cos^2 \beta_0}; \quad (3.21)$$

$$t_{\text{ápice}} = \sqrt{\frac{t_0^3 v_0 \cos^2 \beta_0}{2 R_{\text{NIP}} \sin^2 \beta_0 + t_0 v_0 \cos^2 \beta_0}}. \quad (3.22)$$

Parametrizando em termos da localização do ápice $(x_{\text{ápice}}, t_{\text{ápice}})$ em vez da localização ZO (x_0, t_0) e com $h = 0$, a resposta da difração ZO aproximada (3.20) é escrito na forma:

$$t_D(x) = \sqrt{t_{\text{ápice}}^2 + \frac{4(x - x_{\text{ápice}})^2}{v_c^2}}; \quad (3.23)$$

onde

$$v_c^2 = \frac{2v_0^2 R_{\text{NIP}}}{2 R_{\text{NIP}} \sin^2 \beta_0 + t_0 v_0 \cos^2 \beta_0}, \quad (3.24)$$

onde v_c é a velocidade da migração. Para meios homogêneos, ou seja, $R_{\text{NIP}} = t_0 v_0 / 2$, v_c coincide com a velocidade do meio v_0 . Para meios com camadas horizontais, isto é, $\beta = 0$, v_c se reduz à velocidade de sobretempo normal v_{NMO} que também coincide com a velocidade média-quadrática v_{RMS} . Dessa forma, um somatório é feito ao longo da resposta aproximada da difração, com seu resultado colocado no ápice para aproximar uma migração no tempo com uma velocidade constante v_c , onde todos os atributos contribuem. Nesta estratégia, o somatório é realizado ao longo do operador CRS (2.12), em vez do operador de difração (3.20), e se atribui o resultado ao ápice $(x_{\text{ápice}}, t_{\text{ápice}})$. Dessa forma a velocidade v_c da migração (3.24) está em função dos atributos CRS na posição ZO (x_0, t_0) . Na migração convencional no tempo, a velocidade de migração é definida no ápice de acordo com as equações (3.21) e (3.22) do operador de migração.

4 MIGRAÇÃO

O processo de empilhamento fornece uma primeira forma de imagem da subsuperfície. Entretanto, para estruturas complexas que incluem refletores mergulhantes, falhas e outras formas geológicas, esta imagem não corresponde à realidade. Os dados empilhados podem conter difrações e imagens bastante distorcidas dos refletores na profundidade (tempo) e a migração pós-empilhamento é o processo que visa corrigir estes efeitos. A migração depende do modelo de velocidade que pode ser $v = v(t)$, $v = v(z)$, $v = v(x, t)$ ou $v = v(x, y, z)$.

A migração pode ser realizada no domínio do tempo ou da profundidade. A migração na profundidade é conceitualmente mais simples de entender e é realizada nas seções 6.2, 6.4, 7.2 e 7.4. Esta migração é a imagem desejada pelos geólogos para interpretação. A migração no tempo visa transformar os dados sísmicos registrados em tempo-distância, nas quais as estruturas são corrigidas para tempo-vertical em função da distância.

O processo de migração dos dados foi realizado com o método Kirchhoff utilizando os programas *sumigtk* e *sukdmig2d*, pacote de processamento CWP/SU (COHEN; STOCKWELL, 2005), para migrar as seções sísmicas no tempo e na profundidade, respectivamente.

4.1 Migração Kirchhoff no Tempo

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

$$\nabla^2 u(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -4\pi q(\vec{r}, t), \quad (4.1)$$

onde $u(\vec{r}, t)$ é o campo de onda, c a velocidade constante do meio, $-4\pi q(\vec{r}, t)$ é a fonte, e $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$ é o ponto de observação. A solução completa para a equação (4.1) para um volume V_0 delimitado por uma superfície S_0 é expressa pelo teorema de Green (SCHNEIDER, 1978), e dada por:

$$u(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{t_0} dt_0 \int_{S_0} dS_0 \left[G \frac{\partial}{\partial n} u(\vec{r}_0, t_0) - u(\vec{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial n} G \right]; \quad (4.2)$$

onde $\vec{n} = n\hat{n}$ é um vetor normal à 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 sua contribuição seja desprezível (ver Figura 4.1). 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:

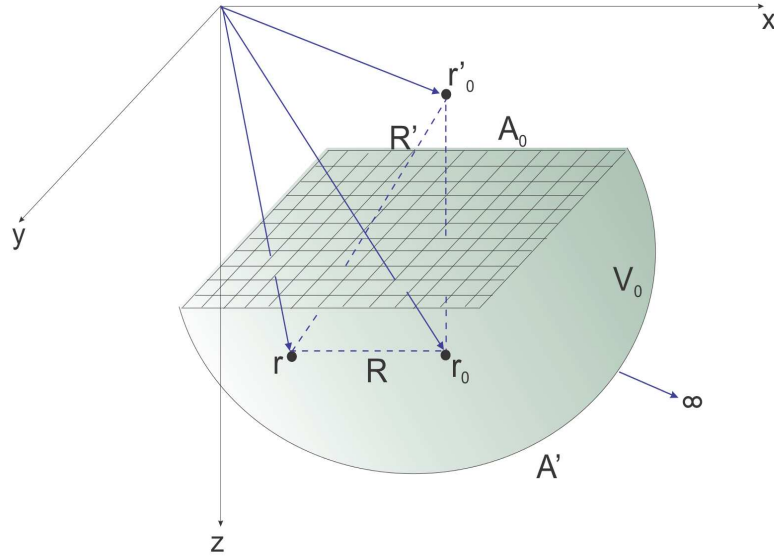
$$G(\vec{r}, t | \vec{r}_0, t_0) = \frac{\delta(t - t_0 - \frac{R}{c})}{R} - \frac{\delta(t - t_0 - \frac{R'}{c})}{R'}, \quad (4.3)$$

onde

$$R = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.4)$$

$$R' = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.5)$$

Figura 4.1: 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 $\vec{r}$.



Fonte: Adaptado de Schneider (1978)

Na prática, o campo $u(\vec{r}_0, t_0)$ é medido na fronteira $S_0 = A_0 + A'$, onde a função de Green se anula ($G = 0$) como uma forma de eliminar a componente $\frac{\partial u(\vec{r}_0, t_0)}{\partial n}$. Com isto, a equação (4.2) é simplificada à forma:

$$u(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{t_0} dt_0 \int_{A_0} dA_0 \left\{ u(\vec{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial z_0} \left[\frac{\delta(t - t_0 - \frac{R}{c})}{R} \right] \right\}, \quad (4.6)$$

que é a integral de Kirchhoff. Substituindo $\frac{\partial}{\partial z_0}$ por $\frac{\partial}{\partial z}$ e resolvendo a parte temporal da

equação (4.6), se obtém:

$$u(\vec{r}, t) = -\frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{A_0} dA_0 \frac{u(\vec{r}_0, t - \frac{R}{c})}{R}. \quad (4.7)$$

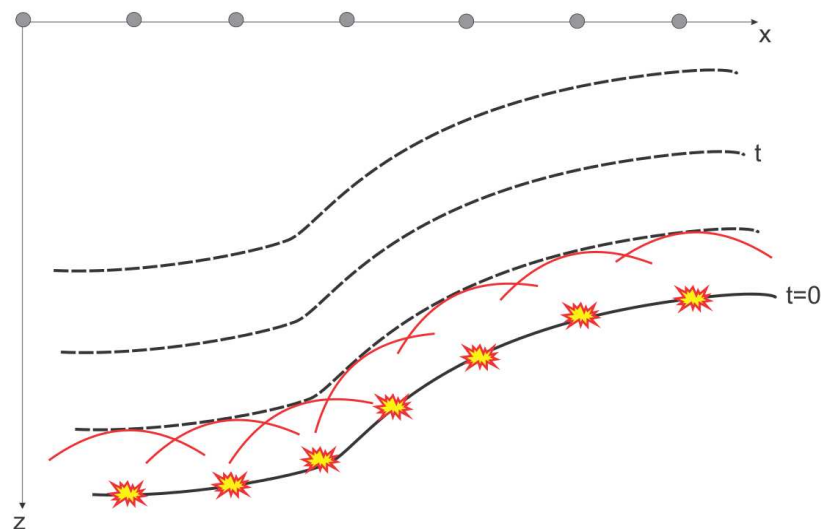
Esta representação mostra que a equação (4.2) é solução da equação da onda em virtude da forma $\frac{f(t-\frac{R}{c})}{R}$ do integrando.

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 4.2). 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 4.3).

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:

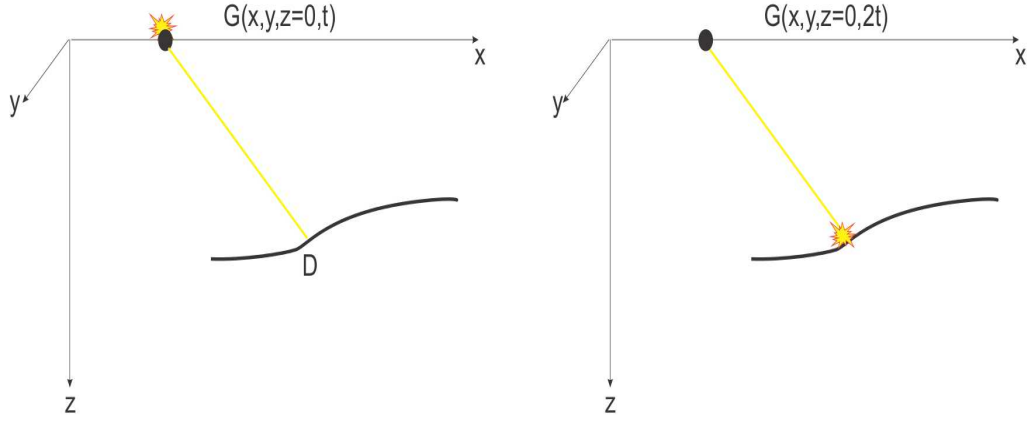
$$u(x, y, z, t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{A_0} dA_0 \frac{u(x, y, z=0, t + \frac{R}{c})}{R}. \quad (4.8)$$

Figura 4.2: 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 $z = 0$.



Fonte: Adaptado de Schneider (1978)

Figura 4.3: Modelo afastamento-nulo (esquerda) e do *refletor-em-explosão* (direita). Na primeira figura o campo de onda parte da superfície no instante $t = 0$, reflete em D e retorna a superfície onde é registrado no tempo t . Na segunda figura se tem outra forma de representar o afastamento-nulo, onde o campo de onda parte de um ponto da subsuperfície em $t = 0$ e é registrado na superfície no tempo $2t$. A velocidade do campo de onda no modelo afastamento-nulo (esquerda) é a metade da velocidade no modelo do *refletor-em-explosão* (direita).



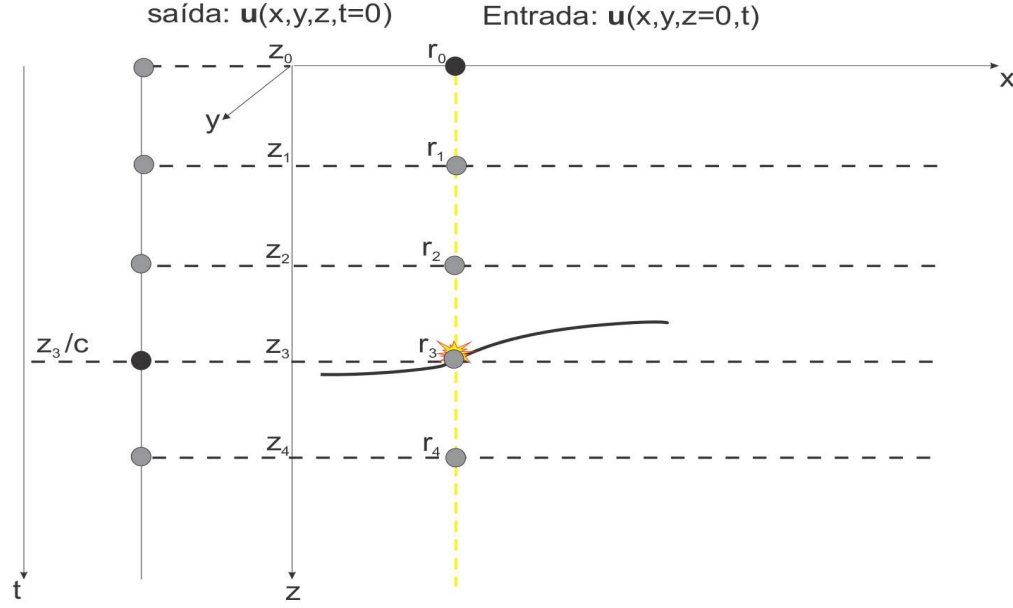
Fonte: Adaptado de Schneider (1978)

Se o objetivo é mapear valores proporcionais às refletividades, se deve calcular a equação (4.8) 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:

$$u(x, y, z, t = 0) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{x_0} \int_{y_0} dx_0 dy_0 \frac{u(x, y, z = 0, \frac{R}{c})}{R}. \quad (4.9)$$

Este processo é denominado migração pós-empilhamento baseado na integral de Kirchhoff, ou simplesmente migração Kirchhoff. A equação (4.9) é a seção migrada 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 $(x, y, z, t = \frac{z}{c})$ correspondente à subsuperfície. A Figura 4.4 mostra 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 em função de z e do tempo $t = z/c$. 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.

Figura 4.4: 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 $(x, y, z, t = \frac{z}{c})$.



Fonte: Adaptado de Schneider (1978)

Assim, segundo o modelo do *refletor-em-explosão* e a migração, a equação (4.9) 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.

4.2 Migração Kirchhoff na Profundidade

Para realizar esta migração é necessário descrever as equações iconal e de transporte para obter, respectivamente, o sistema de traçamento do raio e o termo de amplitude do campo de onda. Em seguida é dada ênfase à teoria paraxial e ao traçamento dinâmico do raio, cujo objetivo é obter o fator de espalhamento geométrico do campo de onda. A seção é finalizada com a migração Kirchhoff na profundidade, onde se mostra seu princípio de funcionamento com as respectivas ilustrações.

Equação iconal

A equação iconal, descrevendo a propagação do tempo de trânsito em um meio isotrópico, tem a forma:

$$(\nabla\tau)^2 = \frac{1}{v^2}, \quad (4.10)$$

onde $\tau = \tau(\vec{x})$ é o tempo de trânsito fonte-receptor, denominado termo iconal, e $v = v(\vec{x})$ é a velocidade da onda. A solução desta equação diferencial parcial não-linear é obtida por meio de seis equações diferenciais ordinárias que formam o sistema de traçamento de raio em coordenadas cartesianas na forma:

$$\frac{dx_i}{d\tau} = v^2 p_i, \quad (i = 1, 2, 3,) \quad (4.11)$$

$$\frac{dp_i}{d\tau} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dx_i}, \quad (i = 1, 2, 3,) \quad (4.12)$$

onde p_i são os componentes do vetor vagarosidade $\vec{p} = \nabla \tau$ (ČERVENÝ, 2000).

Equação do transporte

A equação do transporte é dada por:

$$2\nabla \tau \cdot \nabla A + \Delta \tau A = 0, \quad (4.13)$$

onde A é o termo de amplitude do campo de onda. A equação (4.13) pode ser reescrita como uma equação diferencial ordinária usando o sistema de coordenadas do raio na forma:

$$\frac{2}{v^2} \frac{dA}{d\tau} + \frac{A}{vJ} \frac{d}{d\tau} \left(\frac{J}{v} \right) = 0, \quad (4.14)$$

onde J é o Jacobiano do raio que representa a densidade do campo relacionado ao raio, e escrito na forma de um determinante funcional:

$$J(x, y, z; \tau, \gamma_1, \gamma_2) = \frac{1}{v} \left| \frac{d(x, y, z)}{d(\tau, \gamma_1, \gamma_2)} \right|, \quad (4.15)$$

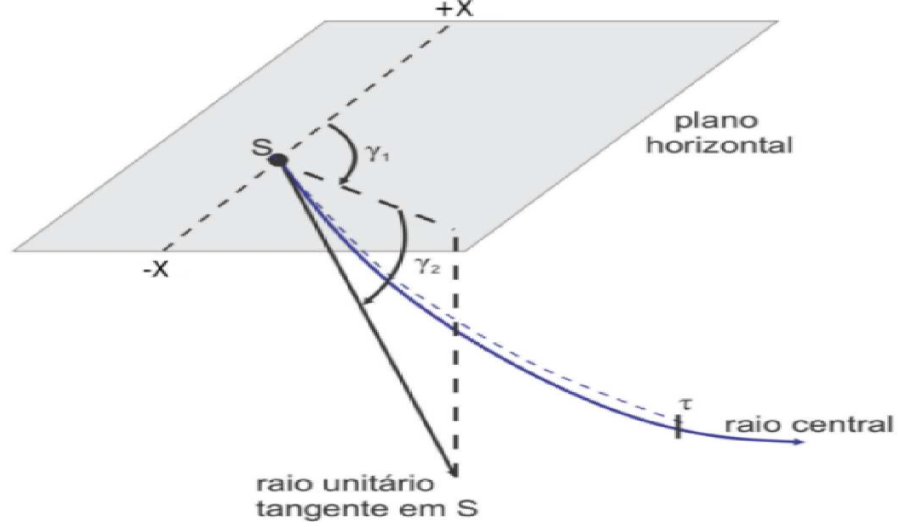
onde τ, γ_1, γ_2 são as coordenadas do raio, sendo o parâmetro τ denominado iconal e γ_1 e γ_2 os parâmetros de partida do raio (ver Figura 4.5).

A equação (4.14) pode ser resolvida pelo método de separação de variáveis, de onde se obtém o termo principal para a amplitude do campo de onda dado por:

$$A = \frac{\sum(\gamma_1, \gamma_2)}{\sqrt{\frac{J}{v}}}, \quad (4.16)$$

onde $\sum$ é a constante de integração dependente dos parâmetros de partida do raio.

Figura 4.5: Sistema de coordenadas do raio. Para uma fonte pontual S em 3D, as coordenadas do raio são dadas pelos ângulos γ_1 e γ_2 , e o argumento iconal $\tau = \tau(\vec{x})$ que especifica uma posição de um ponto sobre o raio. É possível usar o comprimento do arco S em vez do iconal $\tau = \tau(\vec{x})$.



Fonte: Adaptado de Hertweck (2000)

Teoria paraxial e traçamento dinâmico do raio

O sistema de traçamento dinâmico do raio pode ser expresso em coordenadas q_1 , q_2 e q_3 centradas no raio, que é um sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais introduzido de tal forma que o raio em si representa o terceiro eixo do sistema. Os outros dois eixos são ortogonais e situados em um plano perpendicular ao raio (Figura 4.6).

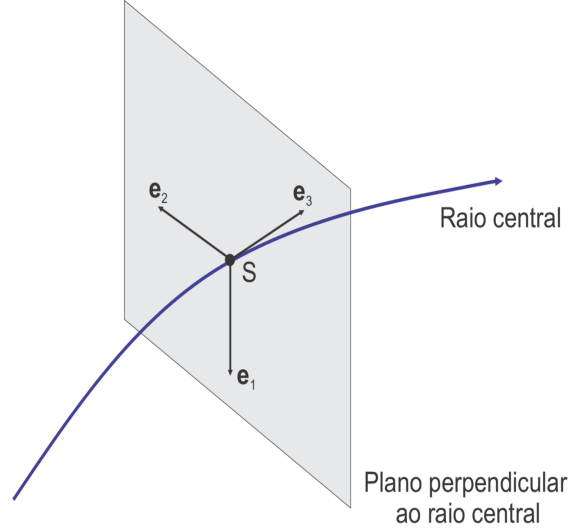
Usando o sistema de coordenadas q_1 , q_2 e q_3 centradas no raio, as coordenadas do raio $\tau = \tau(\vec{x})$, γ_1 e γ_2 , e a relação para o Jacobiano do raio:

$$J \Big|_{\gamma_1=\gamma_{10}, \gamma_2=\gamma_{20}} = \left| \frac{d(x, y, z)}{d(\tau, \gamma_1, \gamma_2)} \right|_{\gamma_1=\gamma_{10}, \gamma_2=\gamma_{20}} = v_0 \left| \frac{d(q_1, q_2)}{d(\gamma_1, \gamma_2)} \right|_{\gamma_1=\gamma_{10}, \gamma_2=\gamma_{20}}, \quad (4.17)$$

onde o índice adicional 0 indica os parâmetros do raio central, a equação (4.16) para a amplitude do campo de onda assume a forma:

$$A = \frac{\sum(\gamma_1, \gamma_2)}{\sqrt{\frac{1}{v} \left| \frac{d(q_1, q_2)}{d(\gamma_1, \gamma_2)} \right|}} \Big|_{\gamma_1=\gamma_{10}, \gamma_2=\gamma_{20}}. \quad (4.18)$$

Figura 4.6: Sistema de coordenadas centradas no raio. O vetor $\vec{e}_3$ é o raio unitário tangente em S , os vetores $\vec{e}_1$ e $\vec{e}_2$ estão localizados em um plano perpendicular ao raio em S . As coordenadas atuais são dadas por q_1 , q_2 e q_3 .



Fonte: Adaptado de Hertweck (2000)

A partir da equação (4.18) o fator de espalhamento geométrico normalizado $|\mathcal{L}_n|$, que descreve a divergência esférica de uma onda proveniente de uma fonte pontual S , é dado por:

$$|\mathcal{L}_n| = \frac{\sqrt{\cos \alpha_S \cos \alpha_R}}{\sqrt{v_S v_R}} \sqrt{|\det \mathbf{B}|}, \quad (4.19)$$

onde v_S e v_R são as velocidades de propagação da onda na fonte pontual S e no ponto receptor R , respectivamente (POPOV, 1996); $\mathbf{B}$ é uma matriz que se relaciona ao fator de espalhamento geométrico de uma onda originária em uma fonte pontual (HERTWECK, 2000); e α_S e α_R são os ângulos inicial e de emergência do raio central em S e R , respectivamente.

Migração Kirchhoff

A migração pós-empilhamento baseada na integral de Kirchhoff (4.9), ou empilhamento de difração Kirchhoff, pode ser reescrita na forma:

$$V(M) = -\frac{1}{2\pi} \int \int_A d\xi_1 d\xi_2 W_{DS}(\xi, M) \frac{\partial U(\xi, t)}{\partial t} \Big|_{t=\tau_D(\xi, M)}, \quad (4.20)$$

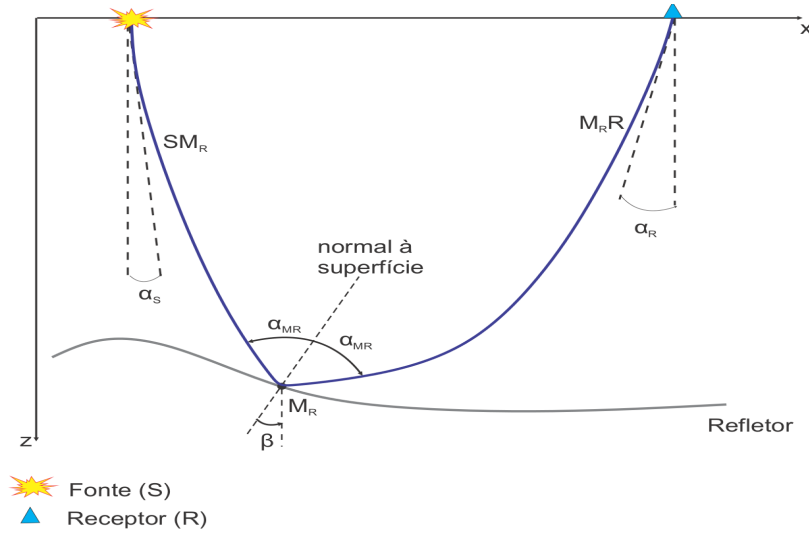
sendo a superfície de empilhamento a superfície de Huygens:

$$t = \tau_D(\xi, M) = \tau(S(\xi), M) + \tau(M, R(\xi)), \quad (4.21)$$

onde τ_D representa o tempo de trânsito da difração, e ξ é um parâmetro que descreve a configuração de fontes e receptores. Para cada ponto M em subsuperfície um geralmente atribui

o valor de $Re\{V(M)\}$ para visualizar a imagem migrada na profundidade. No entanto, para permitir a extração de coeficientes de reflexão complexos no caso de reflexões muito críticas, um tem que considerar inteiramente o valor complexo de $V(M)$. A região de $\frac{\partial U}{\partial t}$ é necessária para recuperar corretamente o pulso fonte (HUBRAL et al., 1996). A janela de integração $A(\xi)$ deve idealmente ser o plano- (ξ_1, ξ_2) total, mas limitado à abertura da aquisição de dados. Na presença de ruído se deve limitar A à uma região menor (abertura da migração) do que a abertura possível definida pelo lanço do levantamento sísmico (SCHLEICHER et al., 1993a). $W_{DS}(\xi, M)$ é a função peso da verdadeira amplitude. A trajetória $t = \tau_D(\xi, M)$ é ilustrada na Figura 4.7 para um ponto-fonte, um ponto-receptor e um ponto-imagem. A trajetória fonte-imagem-receptor é calculada pela teoria do raio resolvendo a equação iconal (4.10).

Figura 4.7: Os ângulos α_S e α_R são os ângulos de partida e de emergência dos dois ramos dos raios em S e R , respectivamente. O ângulo β é o mergulho do refletor, e α_{MR} é o ângulo de incidência do ramo do raio SM_R . Os ângulos podem ser definidos se M_R for um ponto de reflexão real em subsuperfície ou não e se faz uso da direção do ângulo médio definido pelos dois ramos dos raios.



Fonte: Adaptado de Hertweck (2000)

A representação de um campo de pressão analítico associado a um evento de reflexão primária $U(\xi, t)$, considerando o termo de ordem zero da série do raio, é dada por (SCHLEICHER et al., 1993a):

$$U(\xi, t) = R_v \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} f(t - \tau_R(\xi)), \quad (4.22)$$

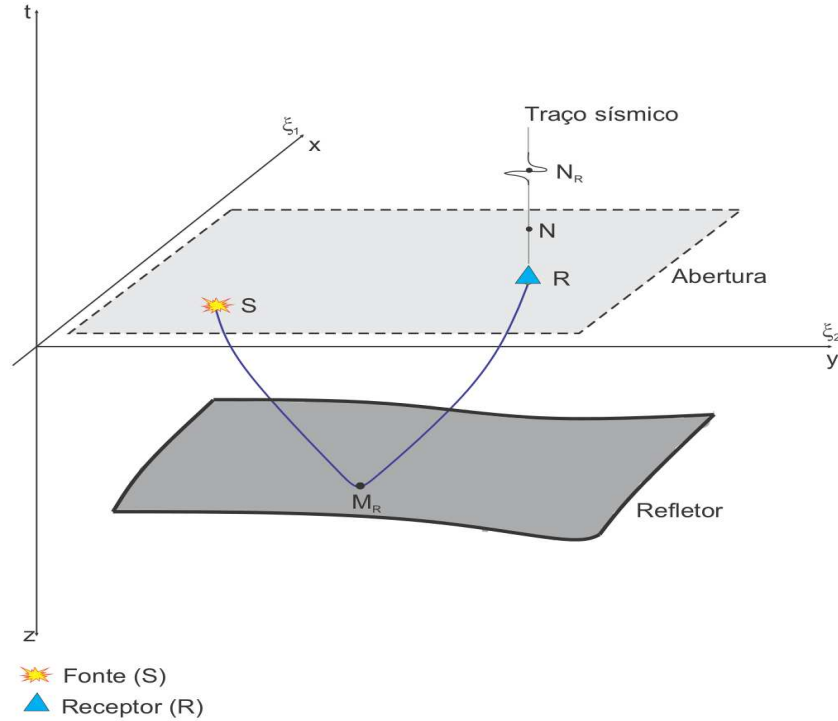
onde $f(t)$ é o sinal analítico da fonte, composto pelo sinal da fonte como parte real e sua transformada de Hilbert como parte imaginária; $\tau_R(\xi)$ representa o tempo de trânsito ao longo do raio SM_RR ; R_v é o coeficiente de reflexão da onda plana no ponto de reflexão; $\mathcal{A}$ é

um fator de absorção que envolve os efeitos de atenuação e transmissividade; $\mathcal{L}$ é o fator de espalhamento geométrico normalizado, introduzido em (4.19), que determina a divergência do fluxo de energia durante a propagação do campo de onda (ver Figura 4.8).

Por reflexão da verdadeira amplitude entende-se a reflexão primária corrigida do fator de espalhamento geométrico (SCHLEICHER et al., 1993a), ou seja:

$$U_{TA}(\xi, t) = \mathcal{L}U(\xi, t) = R_v \mathcal{A}f(t - \tau_R(\xi)). \quad (4.23)$$

Figura 4.8: Seção sísmica 3D, onde a parte superior da imagem mostra o domínio do tempo e a parte inferior o domínio da profundidade com um único refletor. A superfície de medida é dada pelo plano $z = 0$. A seção sísmica é dada pelo volume de dados de todos os traços sísmicos dentro da abertura da migração (janela de integração) A e $t > 0$, ou seja, por todos os pontos $N(\xi, t)$. O ponto N_R representa um evento real ao longo do traço sísmico. No domínio da profundidade os eixos horizontais são denotados por x e z . A seção migrada é dada pelo volume de dados de todos os pontos $M(\vec{r}, z)$ dentro da abertura do refletor E e $z > 0$. O ponto $M_R(x, y, z)$ ilustra um ponto de reflexão real.

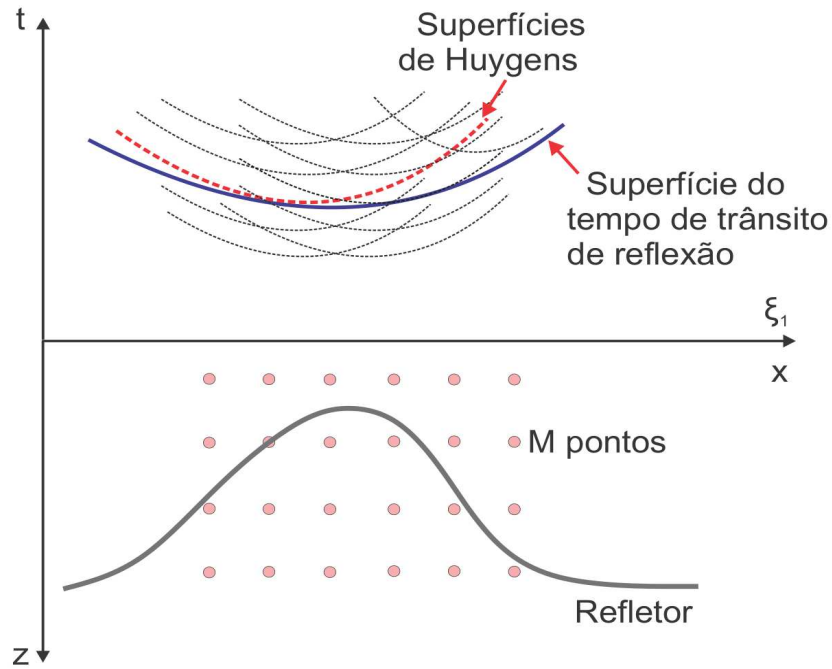


Fonte: Adaptado de Hertweck (2000)

Nos casos onde as perdas devido às transmissões são pequenas, uma seção corrigida dos efeitos do espalhamento geométrico fornece valores proporcionais aos coeficientes de reflexão. Este procedimento de migração é realizado por meio do empilhamento de difração Kirchhoff. A parte cinemática da transformação pode ser realizada considerando uma malha retangu-

lar densa com M pontos no domínio da profundidade, onde se deseja construir a imagem do refletor a partir da seção temporal (ver Figura 4.9). Além disso, todos os M pontos na profundidade sobre a malha são considerados pontos difratores no respectivo modelo de velocidades. A migração resulta do somatório (empilhamento) das amplitudes dos traços sísmicos ao longo da superfície de tempo de difração, e o armazenamento do valor do somatório no correspondente ponto M . A correção de divergência esférica pode ser realizada ponderando as amplitudes dos traços ao longo da superfície de difração durante o processo de empilhamento (SCHLEICHER et al., 1998).

Figura 4.9: Tempo de trânsito τ_R da superfície 3D (superfície do tempo de trânsito da reflexão) para a geometria afastamento-comum, onde diversas superfícies de Huygens para os M pontos estão desenhadas. A migração Kirchhoff na profundidade é realizada pelo empilhamento ao longo de cada superfície de Huygens e apresentando o valor resultante no correspondente ponto difrator M na profundidade. A tangência entre a superfície de reflexão e a de difração define o refletor (atentar especialmente à curva de Huygens marcada na figura). Notar que o refletor só pode ser imageado na zona alvo, ou seja, dentro da malha de M pontos.



Fonte: Adaptado de Hertweck (2000)

A expressão (4.22) se aplica se a superfície de medida $z = 0$ não for uma superfície livre. Nas reflexões sísmicas primárias migradas ocorre uma distorção no pulso ao longo do refletor, consequência de um ângulo de incidência. A relação entre o pulso temporal original e o pulso

na profundidade após a migração pode ser expressa por um fator de estiramento na forma:

$$m_D = \left. \frac{\partial \tau_D}{\partial z} \right|_{M_R} = \frac{2}{v_{M_R}} \cos \alpha_{M_R} \cos \beta, \quad (4.24)$$

onde v_{M_R} é a velocidade local em um ponto de reflexão real M_R em subsuperfície, α_{M_R} é o ângulo de reflexão, e β é o mergulho refletor em M_R (ver Figura 4.7).

Considerando a função W_{DS} ainda indefinida, o ponto M é considerado um ponto de reflexão real em subsuperfície, ou seja, $M = M_R$. À equação (4.20) se introduz o tempo t como um parâmetro adicional e considerando que o principal evento de reflexão primária seja representado por (4.22), se escreve (4.20) na forma:

$$V(M_R, t) = -\frac{1}{2\pi} \int \int_A d\xi_1 d\xi_2 W_{DS}(\xi, M_R) R_v \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} \frac{\partial}{\partial t} W(t + \Delta\tau(\xi, M_R)), \quad (4.25)$$

onde $V(M_R, t)$ representa a superfície de Huygens colapsada a um ponto M_R , $\Delta\tau(\xi, M_R)$ é a diferença dos tempos de trânsito de difração e reflexão, ou seja, $\Delta\tau(\xi, M_R) = \tau_D - \tau_R$. Para $t = 0$ as equações (4.25) e (4.20) são idênticas. No domínio da frequência, a expressão (4.25) tem a forma:

$$\hat{V}(M_R, \omega) = -\frac{i\omega}{2\pi} \hat{W}(\omega) \int \int_A d\xi_1 d\xi_2 W_{DS}(\xi, M_R) R_v \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L}} e^{i\omega\Delta\tau}, \quad (4.26)$$

onde $\hat{W}(\omega)$ e $\hat{V}(M_R, \omega)$ são a transformada de Fourier de $W(t)$ e $V(M_R, t)$, respectivamente.

A equação (4.26) não pode ser solucionada analiticamente, mas pode ser aproximada para altas frequências usando o método de fase estacionária (BLEISTEIN, 1984). Dessa forma, o fator de espalhamento geométrico pode ser decomposto conforme Hubral et al. (1995) como:

$$\mathcal{L}(S, R) = \frac{\mathcal{L}(S, M_R) \mathcal{L}(M_R, R)}{\mathcal{L}_F} = \frac{\mathcal{L}_{SM_R} \mathcal{L}_{M_R R}}{\mathcal{L}_F}, \quad (4.27)$$

onde $\mathcal{L}_{SM_R}$ e $\mathcal{L}_{M_R R}$ são os fatores de espalhamento geométrico da fonte pontual ao longo dos dois ramos dos raios SM_R e $M_R R$, respectivamente. O fator $\mathcal{L}_F$ é chamado “fator de Fresnel” (HERTWECK, 2000) e justifica a influência da zona de Fresnel em M_R sobre o fator de espalhamento geométrico total.

A decomposição do fator de espalhamento geométrico (4.27) é válida independentemente do ponto M ser um ponto de reflexão real em subsuperfície ou não. Além disso, o ponto de fase estacionária deve estar dentro da abertura A da migração, onde as principais contribuições para a integral da equação (4.26) vêm do limite da abertura. O resultado final para a função

peso da verdadeira amplitude é dado na forma:

$$W_{\text{DS}}(\xi, M_R) = \frac{h_B v_M^2}{2 \cos^2 \alpha_M} \mathcal{L}_{\text{SM}} \mathcal{L}_{\text{MR}}, \quad (4.28)$$

onde $h_B = h_B(\xi, M)$ é o determinante de Beylkin ((BEYLKIN, 1985a); (BEYLKIN, 1985b)). A função peso (4.28) corrige efeitos restantes de espalhamento geométrico ao longo dos segmentos do raio e depende da curvatura do refletor.

5 NIPTOMOGRAFIA

O presente capítulo consta da descrição do método de inversão niptomográfica, classificada como não-linear e mal-posta, e baseada na inversão dos atributos do empilhamento CRS como forma de vincular os dados, onde os atributos do campo de onda sísmico são extraídos através do operador (2.12) e no sentido do semblance (3.1).

Os dados sísmicos registrados na superfície não possuem informações suficientes para descrever a verdadeira distribuição de velocidade na subsuperfície ((CLAERBOUT, 1985); (JANNANE; XIE, 1989)). Além disso, existem informações redundantes e espaços nulos que impedem a obtenção de uma única e estável solução para o problema inverso. Sendo assim, vínculos podem ser introduzidos para um modelo de velocidade (suave, híbrido, em camadas ou blocos) onde a velocidade pode ser descontínua nos blocos ou camadas. Outra consideração importante para a escolha do tipo de modelo de velocidade a ser organizado é a geometria do modelo geológico a ser estudado.

5.1 DADOS DE AJUSTE E PARÂMETROS A RESOLVER

Os atributos CRS, associados com as ondas emergentes hipotéticas NIP, são usados para desenvolver um método de inversão niptomográfica cujo objetivo é a determinação de modelos de velocidade isotrópicos suavizados em profundidade. Este método é aplicado apenas para o caso 2D.

As variáveis (β_0 , x , x_0 e x_m) presentes na descrição do método CRS são modificadas neste capítulo para conservar a convenção original de Duveneck (2004) para (α , ξ , ξ_0 e ξ_m), respectivamente.

Dados de entrada

A onda emergente NIP, associada a cada amostra ZO, $P_0(t_0, \xi_0)$, é caracterizada por seu tempo de trânsito do raio normal $\tau_0 = \frac{t_0}{2}$, por sua derivada espacial de primeira ordem do tempo de trânsito (componente horizontal da vagarosidade), $p^{(\xi)}$, por sua derivada espacial de segunda ordem do tempo de trânsito, $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$, e pela localização emergente ξ_0 do raio normal considerado. A onda NIP emergente é representada pelos dados de entrada para a inversão

na forma:

$$\left(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i \quad (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}), \quad (5.1)$$

onde n_{pontos} é a quantidade de pontos marcados na seção empilhada CRS otimizada. As localizações das marcações são independentes, não sendo necessário seguir os eventos de reflexão, e se considera os eventos como primárias, e não-múltiplas.

Um modelo de velocidade é consistente com os dados se os seus componentes das ondas NIP consideradas são corretamente modeladas, no sentido de que o desajuste entre as componentes dos dados observados e os correspondentes do modelo é minimizado.

Parâmetros a resolver

As localizações espaciais dos NIPs (5.1) associados aos refletores inclinados que definem a direção do raio normal são inicialmente desconhecidas. Se a propagação das ondas NIP inicia na subsuperfície, essas quantidades são consideradas parâmetros adicionais do modelo para serem determinadas durante a inversão junto com a distribuição de velocidade. No caso 2D, um NIP na subsuperfície se caracteriza por duas coordenadas espaciais (x, z) e um ângulo θ que define a inclinação local NIP.

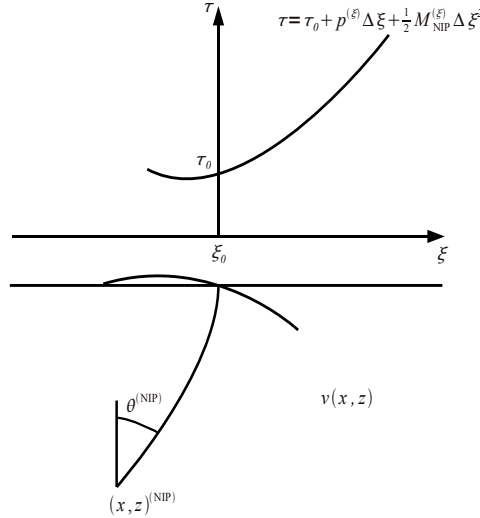
As coordenadas cartesianas globais são denotadas por (x, z) . A direção positiva de z é para cima e a superfície de medida é em $z = 0$. Os pontos de medida da superfície são representados por duas componentes da função $\xi(x, z)$, e as quantidades que caracterizam o NIP na subsuperfície são escritas como:

$$(x, z, \theta)^{(\text{NIP})}, \quad (5.2)$$

onde $x^{(\text{NIP})}$ e $z^{(\text{NIP})}$ são as coordenadas espaciais do NIP, e $\theta^{(\text{NIP})}$ é o ângulo que define a inclinação local NIP. Note que $z^{(\text{NIP})} < 0$, visto que todos os NIPs são localizados abaixo da superfície $z = 0$ (ver Figura 5.1).

A equação (5.1) mostra que cada ponto dos dados, desde que represente uma onda NIP, se associa a um conjunto de parâmetros do modelo (5.2), que representam o correspondente ponto NIP na subsuperfície.

Figura 5.1: Ilustração 2D para definição do modelo e dos componentes dos dados para a inversão niptomográfica 2D. Os componentes $(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi)$ descrevem a curva do tempo de trânsito de segunda ordem τ associada com uma frente de onda emergente NIP, e que são as posições espaciais $(x, z)^{(\text{NIP})}$ do NIP e o ângulo de partida $\theta^{(\text{INI})}$ do raio normal, e a velocidade que é representada pelos coeficientes B-splines v_{jk} na equação (5.3).



Fonte: Duveneck (2004)

Funções B-splines

O modelo de velocidade é definido por funções B-splines (BOOR, 1978) na forma:

$$v(x, z) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{jk} \beta_j(x) \beta_k(-z) \quad (j = 1, 2, \dots, n_x; k = 1, 2, \dots, n_z), \quad (5.3)$$

onde $\beta_j(x)$ e $\beta_l(-z)$ são funções-base B-splines de grau m ; n_x e n_z são o número de colunas e linhas da malha; e v_{jk} são os coeficientes de n_x e n_z , respectivamente. O sinal negativo na expressão (5.3) foi introduzido porque o limite superior é positivo na direção z , enquanto que a correspondente seqüência de nós B-spline aumenta com a profundidade. A função B-spline é uma função de comprimento mínimo sobre uma dada seqüência de nós, e têm derivadas contínuas que permitem um(a):

- descrição analiticamente suave do modelo;
- derivadas contínuas até a $(m - 1)$ -ésima ordem;
- número limitado de parâmetros do modelo associado.

As propriedades da suavidade do modelo são necessárias para permitir a aplicação do método do traçamento de raio, e uma descrição do modelo com poucos parâmetros é possível. Para o caso 2D, o método niptomográfico precisa da derivada contínua de terceira ordem do campo de velocidade, e por isto a função B-spline usada é de grau $m = 4$.

5.2 MODELO DIRETO

O cálculo dos atributos cinemáticos do campo de onda (5.1) é feito por modelagem direta através do traçamento cinemático e dinâmico do raio 2D (DUVENECK, 2004) para se obter as quantidades:

$$\left(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i^{\text{mod}} \quad (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}); \quad (5.4)$$

que são a posição emergente ξ_0 do raio e a componente horizontal $p^{(\xi)}$ do vetor vagarosidade do raio normal em ξ_0 na forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_i}{\partial s} &= \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_i^{(x)}} = V p_i^{(x)}, & (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}) \\ \frac{\partial p_i^{(x)}}{\partial s} &= \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x_i} = -\frac{1}{V^2} \frac{\partial V}{\partial x_i}, & (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

onde $\tilde{H}$ é o Hamiltoniano e s é o comprimento do arco ao longo da curva do raio, $\frac{\partial x_i}{\partial s}$ é o vetor unitário tangente a curva do raio e $\frac{\partial p_i^{(x)}}{\partial s}$ permite avaliar o vetor vagarosidade $\mathbf{p}$ ao longo de um raio contínuo em um meio de variações suaves.

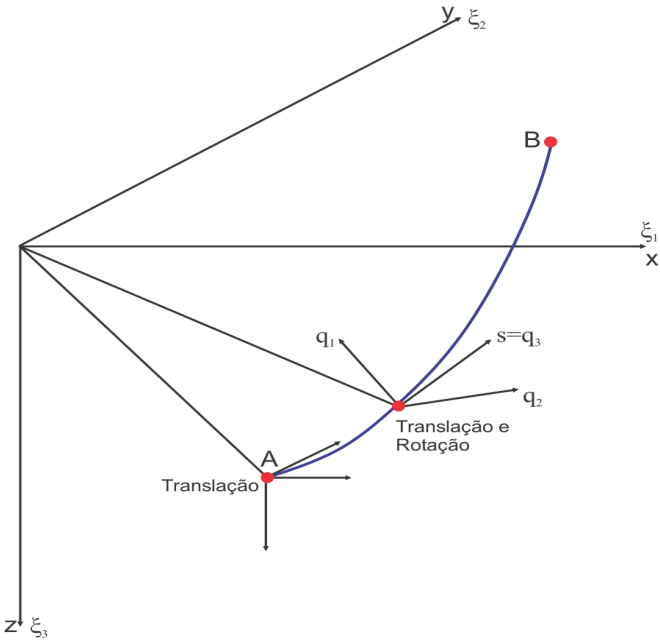
Usando a integral da equação

$$\frac{\partial \tau}{\partial s} = \sum_{i=1}^2 p_i^{(x)} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_i^{(x)}} = \frac{1}{V} \quad (5.6)$$

ao longo do raio obtemos o tempo de trânsito ao longo deste.

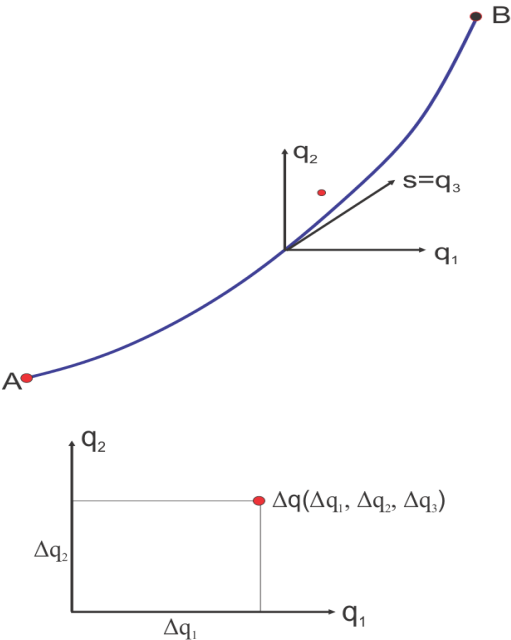
O cálculo de $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ pode ser feito em diferentes sistemas de coordenadas através do traçamento dinâmico do raio, no entanto, o sistema de coordenadas centradas no raio é utilizado por oferecer maior flexibilidade (DUVENECK, 2004) (ver Figuras 5.2 e 5.3).

Figura 5.2: Ilustração 2D de transformação do sistema de coordenadas locais $q_1, q_2, q_3 = S$ centradas no ponto final do raio para o sistema de coordenadas cartesianas globais ξ_1, ξ_2, ξ_3 relacionado à medida da superfície.



Fonte: Autor

Figura 5.3: Figura 5.2 destacando a trajetória do raio do ponto A ao ponto B, onde é enfatizado o sistema de coordenadas centradas no raio $q_1, q_2, q_3 = S$.



Fonte: Autor

No caso 2D, a segunda derivada espacial do tempo de trânsito da onda NIP no raio central é:

$$M_{\text{NIP}} = \frac{P_2}{Q_2}, \quad (5.7)$$

onde P_2 e Q_2 são as soluções do sistema dinâmico de traçamento de raio correspondente a uma fonte pontual.

Em coordenadas cartesianas a equação (5.7) fica:

$$M_{\text{NIP}}^{(\xi)} = (\cos^2 \alpha) M_{\text{NIP}} = (\cos^2 \alpha) \frac{P_2}{Q_2}, \quad (5.8)$$

onde M_{NIP} é dado pela equação (3.16).

Para a solução numérica dos dois sistemas de traçamento de raio, dinâmico e cinemático, foi utilizado o método *Runge-Kutta* de quarta ordem.

5.3 PROBLEMA INVERSO

Esta seção consta da estrutura do problema inverso segundo Duveneck (2004), onde são mostradas as respectivas etapas quanto a sua classificação, dados de entrada e parâmetros do modelo a resolver, função objeto de minimização, fatores de regularização, e informações a priori.

Classificação do problema

Os componentes dos dados de entrada (5.1) e dos parâmetros do modelo (5.11) são organizados em vetores $\mathbf{d}$ e $\mathbf{m}$, respectivamente. O problema inverso é a busca de um modelo ótimo $\mathbf{m}$, de forma que o desajuste entre $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ e o modelo $\mathbf{d}_{\text{mod}} = \mathbf{f}(\mathbf{m})^1$ seja minimizado (MENKE, 1984). Na vizinhança de um dado vetor modelo $\mathbf{m}$ (correspondendo a uma n -ésima iteração) o operador modelagem pode ser localmente aproximado pela série de Taylor ao termo de primeira ordem:

$$f(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}) \approx f(\mathbf{m}) + \mathbf{F}\Delta\mathbf{m}, \quad (5.9)$$

reescrita na forma:

$$\Delta\mathbf{d} = \mathbf{F}\Delta\mathbf{m}, \quad (5.10)$$

para os desvios

$$\Delta\mathbf{d} = (\Delta\tau_0, \Delta M_{\text{NIP}}, \Delta p, \Delta\xi_0)^{(\xi)}$$

¹ $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ é um operador não-linear que relaciona os componentes dos dados e os parâmetros do modelo.

e

$$\Delta \mathbf{m} = (\Delta x, \Delta z, \Delta \theta, \Delta v_{jk})^{(\text{NIP})},$$

e onde $\mathbf{F}$ é uma matriz contendo as derivadas de Fréchet $F_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial m_j}$ de $\mathbf{f}$ em $\mathbf{m}$ (ver Apêndice B). As derivadas de Fréchet podem ser obtidas durante a modelagem direta pela teoria da perturbação do raio (FARRA; MADARIAGA, 1987).

Dados de entrada e parâmetros a resolver

Os dados de entrada à inversão estão descritos em relação à equação (5.1), e são originários das marcações na seção de empilhamento CRS e representados por:

$$\left(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i \quad (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}).$$

Os parâmetros a resolver são representados pela equação:

$$\begin{aligned} (x, z, \theta)_i^{(\text{NIP})} & \quad (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}), \\ v_{jk} & \quad (j = 1, 2, \dots, n_x; k = 1, 2, \dots, n_z); \end{aligned} \quad (5.11)$$

de forma que o desajuste entre os pontos marcados (5.1), as correspondentes quantidades do modelo direto (5.4), e a equação (5.11) seja minimizado no sentido dos quadrados-mínimos. Isso resulta em $4n_{\text{pontos}}$ componentes dos dados e $(3n_{\text{pontos}} + n_x n_z)$ componentes do modelo.

Uma forma clássica de adicionar vínculos ao modelo inverso é que seja inserido a condição de segunda derivada mínima, e estas derivadas são uma medida de rugosidade na função distribuição de velocidade. O vínculo ao modelo de velocidade $v(x, z)$ pode ser realizado por adição de um termo (vetor) extra dos parâmetros do modelo de velocidade $m_{jk} = v_{jk}$ para a função objeto de minimização, $\mathbf{m}^{(v)}$, na forma:

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}^{(\text{NIP})} \\ \mathbf{m}^{(v)} \end{pmatrix}, \quad (5.12)$$

onde $m_i^{(\text{NIP})} = (x, z, \theta)_i^{(\text{NIP})}$.

Função objeto de minimização

A função objeto de minimização com os termos de regularização adicionais é escrita na forma:

$$S(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{d}^T(\mathbf{m}) \mathbf{C}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) + \frac{1}{2} \varepsilon'' \mathbf{m}^{(v)T} \mathbf{D}'' \mathbf{m}^{(v)}. \quad (5.13)$$

$\Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})$ é o vetor desvio dos dados; $\mathbf{C}_D$ é uma matriz covariância dos dados, simétrica positiva, com os elementos diagonais $(C_D)_{ii} = \sigma_i^2$ representando as variâncias (quadrado do desvio-padrão) associadas com o desvio dos componentes dos dados, e desta forma cada ponto dos dados é tratado de acordo com sua incerteza, ou com a expectativa do erro. Considera-se $\mathbf{C}_D$ diagonal, implicando que os erros dos dados são não-correlacionados. A matriz $\mathbf{D}''$ representa a regularização, sendo positiva definida. A quantidade ε'' é o fator de ponderação entre as partes da regularização do operador de inversão.

É necessário estimar o peso do desvio dos componentes dos dados devido aos diferentes tipos de dados com diferentes dimensões físicas envolvidas. Estes fatores de escala são importantes para estabilizar o processo de inversão, transformando os diferentes valores numéricos dos dados em valores compatíveis. Cada ponto dos dados (5.1) possui quatro diferentes tipos de elementos, e segundo Duveneck (2004) se o tempo de trânsito τ_0 tem ordem de grandeza de $10^{-3}s$, a segunda derivada do tempo de trânsito $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ tem ordem de grandeza de $10^{-9}s/m^2$, a primeira derivada do tempo de trânsito $p^{(\xi)}$ tem ordem de grandeza de $10^{-6}s/m$ e a posição ξ_0 for medida em metros, os fatores de escala terão valores adequados respectivamente de $\sigma_\tau = 1$, $\sigma_M = 1$, $\sigma_p = 2$ e $\sigma_\xi = 1$.

Os fatores σ_v e σ_{v_q} são fatores de escala para os vínculos adicionais no modelo de velocidade e determinam quanto esses vínculos contribuem para a solução do problema inverso. A escolha de valores adequados para estes vínculos depende sobre quão seguro a correspondente informação do modelo a priori é. Um certo erro residual deve ser sempre considerado, visto que os valores da velocidade a priori podem ser incompatíveis com a descrição do modelo de velocidade suave usado na inversão. A experiência prática sugere que se as velocidades são medidas em m/s , um valor usual para o correspondente fator peso é $\sigma_v = 1$.

O problema inverso não-linear, em princípio, necessita da aplicação de métodos de otimização não-linear global (SEN; STOFFA, 1995), e o conceito de niptomografia é a solução local baseado numa solução inicial próxima à global (desconhecida).

A atualização dos parâmetros para a próxima iteração $n + 1$, a partir da iteração n , é representada por:

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + \Delta \mathbf{m}_n. \quad (5.14)$$

O método de minimização é estabelecido através da relação clássica:

$$\nabla_{\mathbf{m}} S(\mathbf{m}) = \mathbf{0}; \quad (5.15)$$

para se obter as equações normais:

$$(\mathbf{F}^T \mathbf{C}_D^{-1} \mathbf{F} + \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}'') \Delta \mathbf{m} = \mathbf{F}^T \mathbf{C}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}'' \mathbf{m}_n, \quad (5.16)$$

que precisam ser resolvidas para gerar o vetor de atualização $\Delta \mathbf{m}$. A matriz simétrica $\tilde{\mathbf{D}}''$ (DUVENECK, 2004) introduzida foi obtida da matriz $\mathbf{D}''$ pela adição de linhas e colunas extras contendo somente zeros para que o termo de regularização seja escrito em termos do vetor completo $\mathbf{m}$ na forma:

$$\mathbf{m}^T \tilde{\mathbf{D}}'' \mathbf{m} = \mathbf{m}^{(v)T} \mathbf{D}'' \mathbf{m}^{(v)}. \quad (5.17)$$

Para uma matriz $\hat{\mathbf{F}}$ e um vetor $\Delta \hat{\mathbf{d}}$ definidos na forma:

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_D^{-1/2} \mathbf{F} \\ \tilde{\mathbf{B}} \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad \Delta \hat{\mathbf{d}} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_D^{-1/2} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) \\ -\tilde{\mathbf{B}} \mathbf{m}_n \end{pmatrix}, \quad (5.18)$$

a equação (5.16) é reescrita na forma das equações normais:

$$\hat{\mathbf{F}}^T \hat{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m} = \hat{\mathbf{F}}^T \Delta \hat{\mathbf{d}}. \quad (5.19)$$

A matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ é definida de forma que $\tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{B}} = \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}''$, e a matriz $\tilde{\mathbf{D}}''$ é explicada no apêndice A.

A equação (5.19) $\Delta \mathbf{m}$ é calculada como a solução dos quadrados-mínimos da equação matricial (DUVENECK, 2003):

$$\hat{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m} = \Delta \hat{\mathbf{d}}. \quad (5.20)$$

As linhas da matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ em $\hat{\mathbf{F}}$ e em $\Delta \hat{\mathbf{d}}$ que correspondem aos parâmetros do modelo NIP são nulas. Para a solução da equação (5.20), a matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ em (5.18) pode ser substituída por uma matriz retangular $[\mathbf{0}, \mathbf{B}]$, onde $\mathbf{B}^T \mathbf{B} = \varepsilon'' \mathbf{D}''$.

Resolver a equação (5.20), usando as equações normais, implica no cálculo da matriz $\hat{\mathbf{F}}^T \hat{\mathbf{F}}$ e do vetor $\hat{\mathbf{F}}^T \Delta \hat{\mathbf{d}}$, além de solucionar a equação (5.19). Obtido o vetor de atualização do modelo $\Delta \mathbf{m}$, o vetor do modelo atualizado é dado por $\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + \lambda \Delta \mathbf{m}$, onde $0 < \lambda \leq 1$ é necessário devido a linearização ter sido aplicada, e a função objeto de minimização não ser uma função quadrática de $\mathbf{m}$. Os parâmetros de $\mathbf{m}_{n+1}$ são determinados e novos valores dos dados são modelados pelo traçamento dinâmico do raio. Se a função objeto de minimização em (5.13) aumenta, λ é diminuído e $S(\mathbf{m})$ é recalculada, do contrário, a próxima iteração é iniciada calculando as derivadas de Fréchet no novo modelo.

Problemas surgem quando $\mathbf{F}^T \mathbf{C}_D^{-1} \mathbf{F}$ é singular ou aproximadamente singular, visto que o sistema de equações não contém informações suficientes para determinar todos os parâmetros do modelo, sendo necessário introduzir vínculos adicionais para regularizar o problema.

Regularização

A regularização aplicada a partir da função objeto de minimização (5.13) é dada na forma da medida de curvatura no modelo de velocidade através das derivadas espaciais de segunda ordem. A ponderação pode ser na forma espacialmente variável $[\varepsilon(x, z)]$ e descrita por:

$$\varepsilon'' = \mathbf{m}^{(v)T} \mathbf{D}'' \mathbf{m}^{(v)} = \int_z \int_x \left\{ \varepsilon_{xx}(x, z) \left[\frac{\partial^2 v(x, z)}{\partial x^2} \right]^2 + \varepsilon_{zz}(x, z) \left[\frac{\partial^2 v(x, z)}{\partial z^2} \right]^2 + \varepsilon v^2(x, z) \right\} dx dz, \quad (5.21)$$

O termo $\varepsilon v^2(x, z)$ é adicionado para assegurar que a matriz $\mathbf{D}''$ em (5.13) é positiva definida.

Experimentos mostram que a variável vínculo espacial é especialmente útil nas bordas do modelo de velocidade, onde a informação no dado (5.1) é insuficiente para vincular os coeficientes B-splines externos.

Informações a priori: velocidade e estrutura do refletor

A velocidade real da subsuperfície pode ser usada na inversão desde que seja conhecida, ou possa ser estimada, em determinadas localizações. Tal informação também pode ser extraída de medições diretas obtidas em levantamentos sísmicos de pequena escala próximos à superfície ou levantamentos de poço, ou ainda de um conhecimento geológico a priori da subsuperfície. Para dados marinhos, um vínculo conhecido do modelo é a velocidade acústica na água. Esta informação a priori para a velocidade é tratada como um dado adicional. Se os valores da velocidade estão disponíveis em um total de $n_{v\text{pontos}}$ localizações da subsuperfície, então os vínculos:

$$v(x_i, z_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n_{v\text{pontos}}) \quad (5.22)$$

são adicionados ao vetor dos dados, $\mathbf{d}$. Durante o processo inverso o desajuste entre estes valores de velocidade e as velocidades do modelo, nos respectivos pontos da subsuperfície, é minimizado. Os correspondentes elementos diagonais da matriz covariância $\mathbf{C}_D$ determinam o peso relativo fornecido à estes pontos adicionais dos dados. Até mesmo se a informação da velocidade contida nestes pontos dos dados é considerada confiável, um certo erro residual deve ser considerado.

Utilizando o sistema de coordenadas centradas no raio (Figura 5.3), o vínculo adicional ao modelo em 2D é implementado com a minimização da primeira derivada da velocidade local ao longo do refletor, ou seja:

$$|\nabla_{\mathbf{q}} v|_{(x,z)_i}^{(\text{NIP})} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n_{\text{pontos}}), \quad (5.23)$$

onde q corresponde a direção normal ao raio e , dessa forma, se tem n_{pontos} a mais nos componentes dos dados.

Adicionando estes vínculos temos um total de $(5n_{\text{pontos}} + n_{\text{vpontos}})$ componentes dos dados por $(3n_{\text{pontos}} + n_x n_z)$ componentes do modelo. As derivadas de Fréchet correspondentes ao caso 2D são apresentadas no apêndice B.

O critério de minimização da derivada de primeira ordem da velocidade, ao longo dos refletores nos pontos de incidência normais, só pode ser usado se os pontos dos dados marcados correspondem à eventos de reflexão nos dados. Para eventos de difração este critério não faz sentido. Para cada evento de reflexão o critério deve ser usado com cautela, tendo em vista que se baseia em considerações muito simples e, dessa maneira, um certo erro residual deve ser novamente considerado na minimização em (5.23). Os pesos correspondentes (elementos diagonais da matriz $\mathbf{C}_D$) devem ser escolhidos apropriadamente.

5.4 MATRIZ TOMOGRÁFICA 2D

Nesta seção a matriz tomográfica $\hat{\mathbf{F}}$ mostrada em (5.20) é solucionada a partir de uma nova forma de definir o vetor dos dados de entrada $\mathbf{d}$ e os parâmetros do modelo $\mathbf{m}$ em função dos vínculos adicionais aplicados, cuja forma de solução se baseia no algoritmo LSQR para solucionar matrizes esparsa.

Vetor dos dados

Com as derivadas de Fréchet calculadas, pode-se criar a matriz tomográfica, que depende da forma dos vetores do modelo e dos dados. Para o caso mais geral (com vínculos adicionais do modelo), o vetor dos dados $\mathbf{d}$ é definido como:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} \mathbf{d}^{(\text{NIP})} \\ \mathbf{d}^{(\text{vinc})} \end{pmatrix}, \quad (5.24)$$

com

$$\mathbf{d}^{(\text{NIP})} = \left(\tau_{01}, \dots, \tau_{0n_{\text{pontos}}}, M_{\text{NIP}1}^{(\xi)}, \dots, M_{\text{NIP}n_{\text{pontos}}}^{(\xi)}, p_1^{(\xi)}, \dots, p_{n_{\text{pontos}}}^{(\xi)}, \xi_{01}, \dots, \xi_{0n_{\text{pontos}}} \right)^T$$

e

$$\mathbf{d}^{(\text{vinc})} = [v(x_1, z_1), \dots, v(x_{n_{\text{vpontos}}}, z_{n_{\text{vpontos}}}), 0_1, \dots, 0_{n_{\text{pontos}}}]^T. \quad (5.25)$$

Vetor dos parâmetros

O vetor modelo é definido como:

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}^{(\text{NIP})} \\ \mathbf{m}^{(v)} \end{pmatrix}, \quad (5.26)$$

com

$$\mathbf{m}^{(\text{NIP})} = \left(x_1^{(\text{NIP})}, \dots, x_{n_{\text{pontos}}}^{(\text{NIP})}, z_1^{(\text{NIP})}, \dots, z_{n_{\text{pontos}}}^{(\text{NIP})}, \theta_1^{(\text{NIP})}, \dots, \theta_{n_{\text{pontos}}}^{(\text{NIP})} \right)^T$$

e

$$\mathbf{m}^{(v)} = (v_{11}, \dots, v_{1n_z}, \dots, v_{n_x n_z})^T, \quad (5.27)$$

onde $m_{[(i-1)n_z+j]}^{(v)} = v_{ij}$.

Matriz tomográfica

A matriz tomográfica $\hat{\mathbf{F}}$, na equação (5.20), toma a forma:

$$\hat{\mathbf{F}} = \left(\begin{array}{ccc|c} \frac{1}{\sigma_\tau} \left[\frac{\partial \tau_0}{\partial x^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_\tau} \left[\frac{\partial \tau_0}{\partial z^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_\tau} \left[\frac{\partial \tau_0}{\partial \theta^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_\tau} \left[\frac{\partial \tau_0}{\partial v} \right] \\ \frac{1}{\sigma_M} \left[\frac{\partial M_{\text{NIP}}^{(\xi)}}{\partial x^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_M} \left[\frac{\partial M_{\text{NIP}}^{(\xi)}}{\partial z^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_M} \left[\frac{\partial M_{\text{NIP}}^{(\xi)}}{\partial \theta^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_M} \left[\frac{\partial M_{\text{NIP}}^{(\xi)}}{\partial v} \right] \\ \frac{1}{\sigma_p} \left[\frac{\partial p^{(\xi)}}{\partial x^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_p} \left[\frac{\partial p^{(\xi)}}{\partial z^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_p} \left[\frac{\partial p^{(\xi)}}{\partial \theta^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_p} \left[\frac{\partial p^{(\xi)}}{\partial v} \right] \\ \frac{1}{\sigma_\xi} \left[\frac{\partial \xi_0}{\partial x^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_\xi} \left[\frac{\partial \xi_0}{\partial z^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_\xi} \left[\frac{\partial \xi_0}{\partial \theta^{(\text{NIP})}} \right] & \frac{1}{\sigma_\xi} \left[\frac{\partial \xi_0}{\partial v} \right] \\ \hline & [0_v] & & \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial v^{(\text{vinc})}}{\partial v} \right] \\ & [0_{v_q}] & & \frac{1}{\sigma_{v_q}} \left[\frac{\partial (\nabla_q v)}{\partial v} \right] \\ & [0_B] & & [\mathbf{B}] \end{array} \right) \quad (5.28)$$

A parte superior esquerda de $\hat{\mathbf{F}}$ é formada por matrizes diagonais $n_{\text{pontos}} \times n_{\text{pontos}}$ contendo as derivadas de Fréchet relativas aos parâmetros do modelo NIP (DUVENECK, 2004) e a parte superior direita de $\hat{\mathbf{F}}$ é formada por matrizes $n_{\text{pontos}} \times n_x n_z$ contendo as correspondentes derivadas de Fréchet relativas aos parâmetros do modelo de velocidade v_{jk} .

A matriz $n_{\text{vpontos}} \times n_x n_z \left[\frac{\partial v^{(\text{vinc})}}{\partial v} \right]$ contém as derivadas de Fréchet dos vínculos de in-formação a priori da velocidade. As correspondentes derivadas destes vínculos em relação aos parâmetros do modelo NIP são zero, resultando na matriz nula $n_{\text{vpontos}} \times 3n_{\text{pontos}}[0_v]$. Os elementos da matriz $n_{\text{pontos}} \times n_x n_z \left[\frac{\partial (\nabla_q v)}{\partial v} \right]$ são as derivadas de Fréchet associadas aos vínculos (5.23) em relação aos parâmetros do modelo de velocidade v_{jk} . As correspondentes derivadas de Fréchet destes vínculos em relação aos parâmetros do modelo NIP também são assumidas nulas, resultando na matriz $n_{\text{pontos}} \times 3n_{\text{pontos}}[0_{v_q}]$.

A matriz $[\mathbf{B}]$ é uma matriz $n_x n_z \times n_x n_z$ triangular-superior idêntica à matriz $\mathbf{B}$ definida para o caso 3D na forma:

$$\varepsilon'' \mathbf{D}'' = \mathbf{B}^T \mathbf{B}, \quad (5.29)$$

onde $\mathbf{B}$ possui as mesmas dimensões de $\mathbf{D}''$ e $\varepsilon'' > 0$. A matriz $[\mathbf{B}]$ é calculada da matriz $\varepsilon''\mathbf{D}''^{(2D)}$ através da decomposição de Cholesky e $[0_B]$ é uma matriz nula $n_x n_z \times 3n_{\text{pontos}}$.

Forma de solução

Substituindo a matriz (5.28) em (5.20) teremos um sistema de equações lineares muito grande para ser resolvido por decomposição de valores singulares. A matriz $\hat{\mathbf{F}}$ é esparsa e o método LSQR ((PAIGE; SAUNDERS, 1982a); (PAIGE; SAUNDERS, 1982b)) é um método eficiente para resolver esse tipo de sistemas lineares da forma da equação (5.28), visto que é um método iterativo equivalente analiticamente ao algoritmo gradiente-conjugado (GILL; WRIGHT, 1981), porém com propriedades numéricas mais favoráveis, em particular para sistemas mal-postos, pois permite armazenar a matriz $\hat{\mathbf{F}}$ na forma de uma matriz esparsa e resolver diretamente (5.20) para encontrar $\Delta\mathbf{m}$ sem precisar inverter uma matriz.

5.5 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE INVERSÃO

Os elementos essenciais para a inversão niptomográfica 2D com os atributos CRS foram apresentados na seção 5.4. O procedimento detalhado é descrito nas seguintes combinações desses elementos dentro de um esquema geral, no qual é válido para as inversões 1D, 2D e 3D. Os parâmetros dos dados foram extraídos de dados sísmicos resultantes do empilhamento CRS e são disponíveis como entrada para a inversão. O algoritmo segue as seguintes etapas:

1. Criação de um modelo de velocidade inicial pela atribuição de valores significativos para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$. Os fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados (os elementos da matriz diagonal $\mathbf{C}_D$), os pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , e os fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε também precisam ser especificados.
2. Para cada conjunto dos parâmetros dos dados, um raio normal é traçado no modelo na direção descendente até atingir o respectivo tempo de trânsito τ_0 . Cada raio se origina na superfície de medida ($z = 0$) em uma localização emergente ξ_0 e sua direção é definida pelo ângulo de emergência do raio central calculado pelos correspondentes componentes dos dados. O ponto final do raio na subsuperfície, definido por $\tau_0 = 0$, é a localização inicial do NIP e o vetor vagarosidade do raio no NIP produz a normal ao refletor. Baseando-se nestas informações, o modelo NIP inicial, para o vetor $\mathbf{m}^{(\text{NIP})}$, pode ser estabelecido.
3. Traçamento dinâmico de raios na direção ascendente, iniciando no respectivo NIP, para determinar os parâmetros da modelagem direta, realizada por $\mathbf{d}_{\text{mod}}$. Simultaneamente,

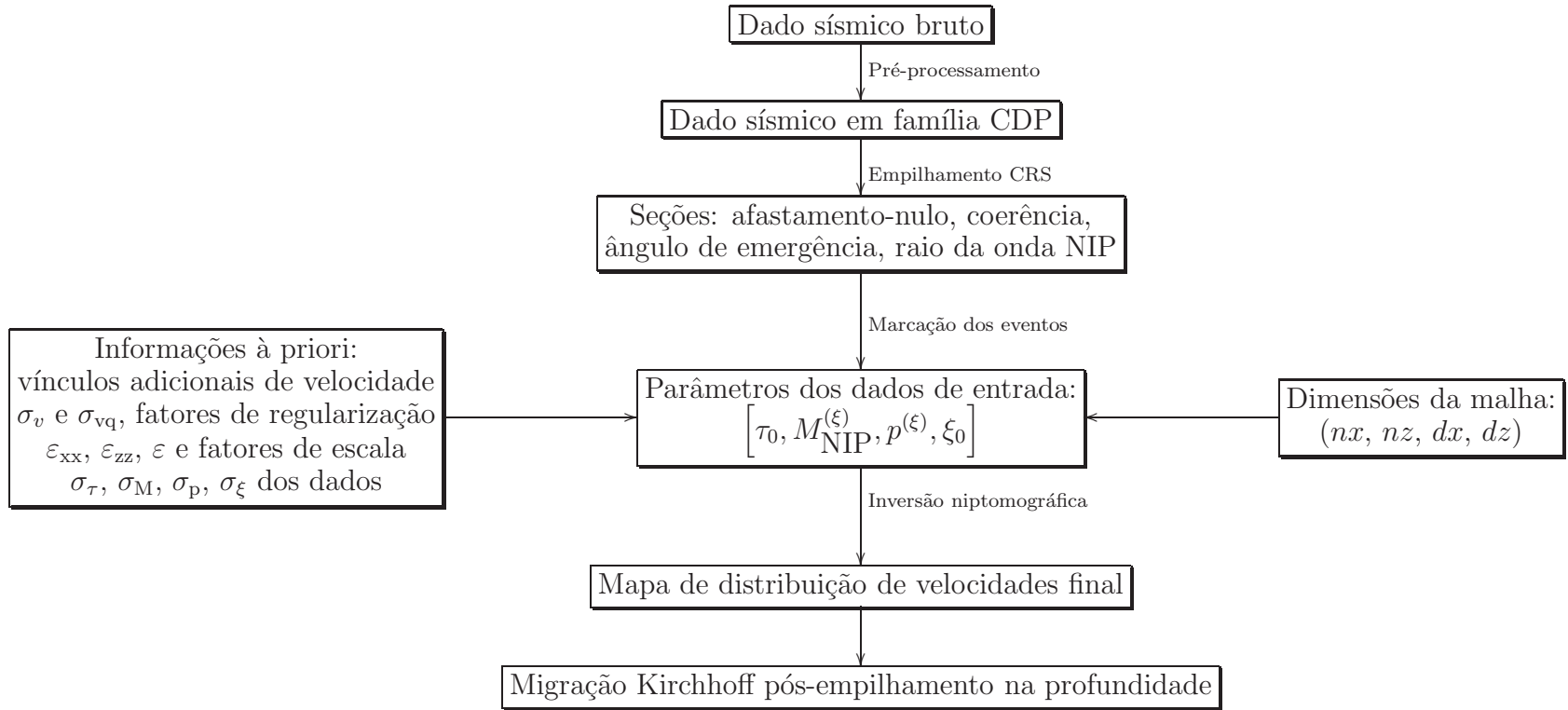
os elementos da matriz $\mathbf{F}$ (as derivadas de Fréchet) são calculados pela aplicação da teoria da perturbação do raio ao longo de cada raio normal.

4. A função objeto de minimização (5.13) é estimada pelo cálculo do desajuste entre os dados de $\mathbf{d}$ e $\mathbf{d}_{\text{mod}}$ e o cálculo do termo de regularização do vetor modelo de velocidade $\mathbf{m}^{(v)}$.
5. Construção do sistema de equações lineares (5.20) e solução segundo os quadrados mínimos usando um método numérico apropriado, denominado algoritmo LSQR, para obter um vetor atualizado $\Delta\mathbf{m}$ do modelo.
6. O modelo atualizado, multiplicado por um fator $0 < \lambda \leq 1$, é adicionado ao modelo atual e o modelo direto obtido (traçamento dinâmico do raio) é realizado com os novos parâmetros do modelo para se obter um novo vetor $\mathbf{d}_{\text{mod}}$.
7. Análise da função objeto de minimização, calculada a partir do desajuste dos dados de $\mathbf{d}$ e o novo $\mathbf{d}_{\text{mod}}$.
8. Se a função objeto de minimização aumenta, o modelo atualizado é rejeitado, λ reduz e as etapas 6 e 7 são repetidas até a função objeto de minimização diminuir ou λ reduzir abaixo de um valor específico. Se a função objeto de minimização não diminui, mesmo para pequenos valores de λ , um mínimo da função objeto foi alcançado.
9. Se a função objeto de minimização diminui, o modelo atualizado é aceito, o peso da regularização ε'' é diminuído e a próxima iteração é iniciada voltando à etapa 3 onde será utilizado o novo modelo de velocidade.
10. O procedimento é interrompido quando um determinado número de iterações ou se a função objeto de minimização tiver atingido um determinado valor menor que um valor pré-especificado.

Com exceção da etapa 1, todas as etapas do algoritmo de inversão são realizadas automaticamente com ou sem interação humana. A representação esquemática do fluxograma com todas as etapas do processo de inversão niptomográfica estão descritas na Figura 5.4.

A redução sistemática dos fatores de regularização ε'' durante a inversão visa permitir que os recursos de grandes comprimentos de onda do modelo de velocidade sejam determinados durante as fases iniciais do processo de inversão, enquanto mais e mais detalhes do modelo possam ser solucionados nas iterações posteriores.

Figura 5.4: Fluxograma do processo de inversão niptomográfica baseado nos atributos CRS.



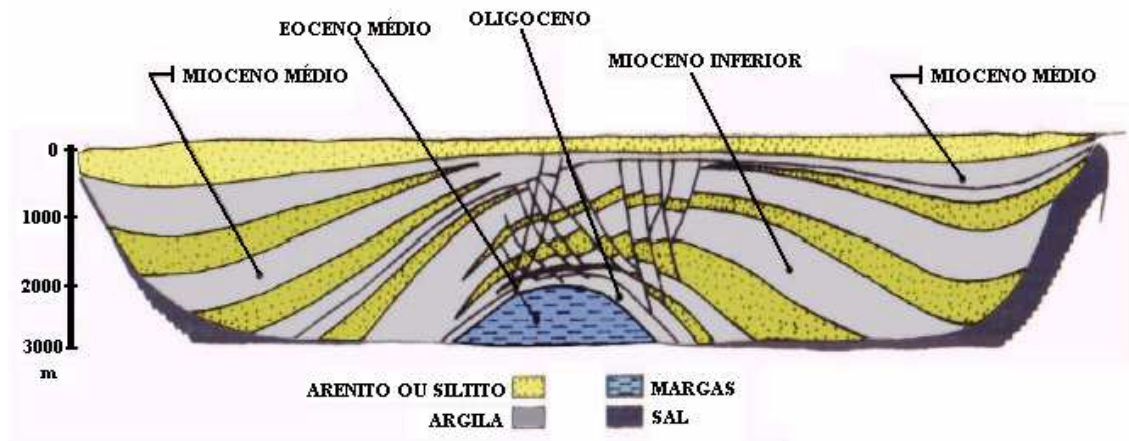
6 MODELO MARMOUSI

No presente capítulo são apresentados aspectos geológicos e aquisição sísmica do modelo Marmousi, e os resultados obtidos no processamento e imageamento sísmico 2D, através da aplicação dos métodos de empilhamento NMO e CRS e da técnica de inversão niptomográfica dos atributos cinemáticos do campo de onda.

6.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS E AQUISIÇÃO

O modelo Marmousi foi criado em 1988 pelo Instituto Francês do Petróleo (IFP, Institut Français du Pétrole), utilizando o programa MIMICTM do software SIERRA. A geometria é baseada nas informações do perfil geológico da bacia de Cuanza, localizada em Quenguela Norte (Angola-África) (Figura 6.1), e a geologia consiste de duas fases diferentes.

Figura 6.1: Perfil geológico da bacia de Cuanza localizado em Quenguela Norte (Angola-África), utilizado para construção do modelo Marmousi.



Fonte: Versteeg e Grau (1991)

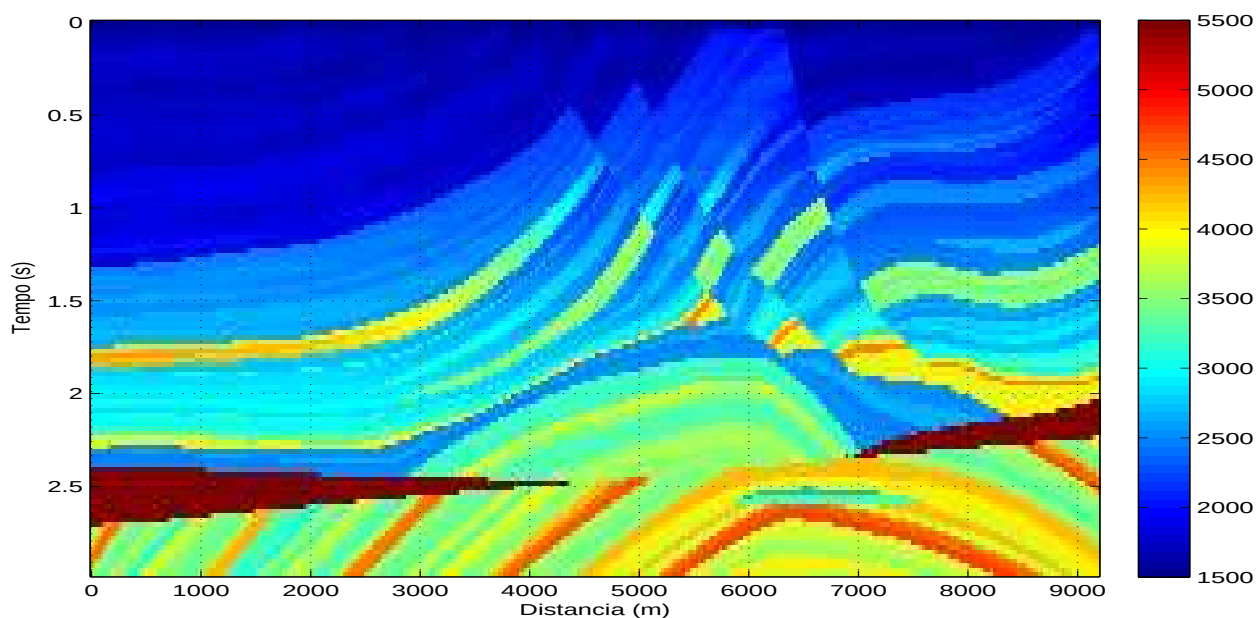
A primeira fase (inferior) corresponde à uma contínua sedimentação de carbonatos e margas. No fim da sedimentação, estes depósitos foram ligeiramente dobrados e então erodidos a uma superfície plana.

A segunda fase (superior) começou com a deposição de uma série evaporítica salífera

isopaca. Nesta fase, uma série de argila-margosa, rica em material orgânico, foi depositada. Estes resíduos foram seguidos por uma espessa deposição de sedimentos detríticos xistoso-arenoso, com uma fonte ocidental cujas espessuras faciais foram governadas por contínuas movimentações laterais de sal resultante da pressão sobrecarregada. Vinculadas a esta deformação salífera, a qual provoca localmente desaparecimento completo do sal, este crescimento inclinado exibi falhas que estiveram ativas continuamente durante a deposição de séries detríticas. A esperança de prospectar petróleo são armadilhas relacionadas à estruturas de sal e à profundas estruturas anticlinais.

Os dados sísmicos tratam de um conjunto de dados acústico sintético 2D, com uma malha de velocidades e densidades, definidas pela introdução de fortes gradientes de velocidades horizontais e verticais, com a finalidade de produzir dados sísmicos complexos de inversão e imageamento de reflexão sísmica. A Figura 6.2 mostra o modelo de velocidades do Marmousi no domínio do tempo.

Figura 6.2: Modelo de velocidade no tempo original de referência do Marmousi.



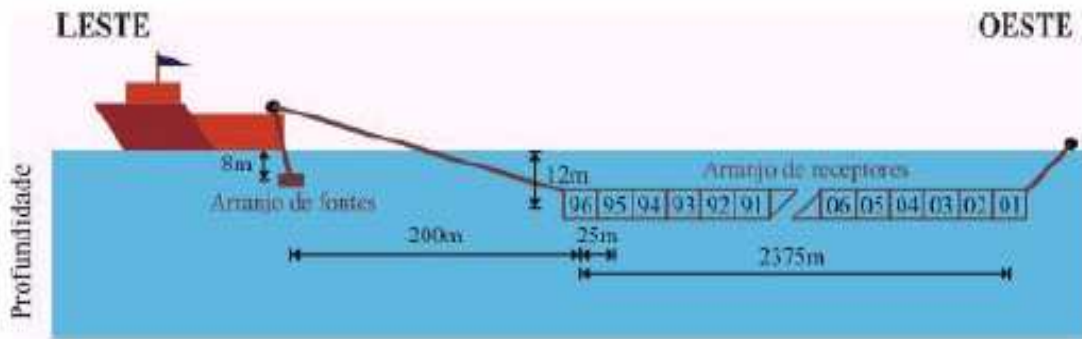
Fonte: Versteeg e Grau (1991)

Os dados foram generalizados por intermédio de um pacote de modelagem, que pode simular uma linha sísmica, calculando sucessivamente os diferentes registros de tiro. O modelador da propagação de onda acústica 2D usa um esquema de diferenças finitas de segunda ordem (ambos em espaço e tempo). As condições da terceira ordem de limite absorventes

são usadas para reduzir efeitos de borda não desejados.

O modelo consiste de 240 seções de fonte comum, com o primeiro e último tiros nas estações $3000m$ e $8975m$, respectivamente, e intervalo entre tiros consecutivos de $25m$. A fonte sísmica é formada por um conjunto de 6 canhões de ar comprimidos distribuídos em uma extensão de $40m$, à uma distância de $8m$ entre estes. A profundidade da fonte sísmica é de $8m$ e sua posição é considerada o meio do conjunto dos 6 canhões (Figura 6.3). Todas as fontes são emitidas com o mesmo pulso e disparadas simultaneamente. O pulso sísmico dos canhões marinhos é obtido através da digitalização de um pulso sísmico real utilizado no campo, cujo pulso é filtrado com um filtro trapezoidal de frequência (0, 10, 40, 60Hz). Aplicando este filtro, tem-se aproximadamente o mesmo efeito de um filtro passa-baixa aplicado durante o registro.

Figura 6.3: Ilustração da configuração geométrica (2D) do cabo flutuador para geração dos dados Marmousi.



Fonte: Versteeg e Grau (1991)

O cabo flutuador tem um arranjo de receptores com 96 grupos de hidrofones (cada grupo possui 5 hidrofones espaçados $4m$ um do outro), a uma profundidade de $12m$, distância entre grupos de $25m$, com afastamento mínimo e máximo da fonte de $200m$ e $2575m$, respectivamente. Cada grupo compreende 5 hidrofones a uma distância de $4m$ entre cada um. O tempo total de registro dos sismogramas é de $3s$, com um intervalo de amostragem dos traços sísmicos de $0.004s$. O modelo possui 160 camadas horizontais, além de uma série de falhas e blocos inclinados resultantes que complicam o modelo em direção ao seu centro. Situa-se abaixo de aproximadamente $32m$ de água, com dimensões de $9200m$ em distância por $3000m$ em profundidade, com um comprimento da malha de $4m$ tanto na horizontal quanto na vertical. Sua distribuição de velocidade na parte mais rasa tem um elevado gradiente vertical e forte compactação.

É importante ressaltar que por se tratar de um dado sintético, não foi necessário aplicar as etapas que compõem o pré-processamento sísmico, uma vez que o ruído presente da modelagem é pequeno. Todas as seções empilhadas e migradas apresentadas neste capítulo estão com ganho *agc* (*automatic gain control*), com uma janela de 0.5s, aplicados para melhorar a visualização dos resultados (revelar eventos com baixa amplitude).

A tabela 6.1 contém os parâmetros de aquisição relevantes do dado.

Tabela 6.1: Parâmetros de aquisição do conjunto de dados pré-empilhado do modelo Marmousi.

Geometria de tiros e receptores		Geometria CMP	
Número de tiros	240	Número de CMP	574
Intervalo de tiros	25m	Intervalo entre CMP	12.5m
Profundidade da fonte	8m	Máxima cobertura	60
Número de receptores	96	Distância horizontal da malha	9200m
Intervalo entre receptores	25m	Distância vertical da malha	3000m
Profundidade dos receptores	12m		
Lanço dos receptores	200m à 2575m		
Estações de tiros	3000m à 8975m		
Estações de receptores	425m à 8775m		

Parâmetros de gravação	
Tempo de gravação	3.0s
Intervalo de amostragem	4ms
Número de amostras por traço sísmico	750

6.2 PROCESSAMENTO SÍSMICO

6.2.1 Empilhamento NMO

A metodologia do processamento é realizada de diferentes caminhos, uma vez que depende dos objetivos traçados, da qualidade dos dados sísmicos, dos algoritmos utilizados, e do aparato computacional disponível. No entanto, o procedimento é em geral realizado de acordo com uma rotina composta por uma seqüência básica, como ilustrado no fluxograma da Figura 3.1.

A Figura 6.4 mostra o modelo de velocidade original de referência do Marmousi (Figura

6.2) no domínio do tempo suavizado à 20 pontos, e a Figura 6.5 mostra este modelo remapeado para profundidade pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$. Estes modelos de velocidade foram utilizados como referência à todos os modelos obtidos através da análise de velocidade via semblance e da inversão niptomográfica.

A Figura 6.6 mostra o modelo de velocidade suavizado no tempo obtido para o Marmousi através de marcações manuais realizadas no mapa semblance, onde cada CDP marcado teve seu número de pontos interpolado para o mesmo número de amostras. Observar seu forte contraste de velocidade lateral. A Figura 6.7 mostra o modelo de velocidade representado por mapas de contorno evidenciando os diferentes contrastes de variação vertical-horizontal de velocidade, onde se observa que as regiões de maior velocidade estão distribuídas nas áreas mais profundas da seção.

O mapa de distribuição de velocidades em profundidade da Figura 6.8 (comparar com a Figura 6.28) foi obtido através da Figura 6.6 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$, onde se observa que as regiões de maior velocidade se distribuem nas localizações mais profundas da seção geológica. O modelo da Figura 6.8 representado por mapas de contorno é mostrado na Figura 6.9, onde se observa os diferentes contrastes de variação de velocidade bem divididos.

Os modelos de velocidade nos domínios do tempo e da profundidade obtidos para o Marmousi (Figuras 6.6 e 6.8) foram comparados com o original de referência (Figura 6.2) e com seus respectivos modelos suavizados (Figuras 6.4 e 6.5), e todos eles foram aplicados nas seções sísmicas para se obter os empilhamentos e migrações nos respectivos domínios.

Os resultados do empilhamento NMO (Figura 6.10) e da migração Kirchhoff (Figuras 6.11 e 6.12), no tempo, foram obtidos utilizando os modelos de velocidade das Figuras 6.6 e 6.4 (comparar com a Figura 6.18), e evidenciam a boa consistência com as descrições das estruturas geológicas, uma vez que as seções mostram refletores bem contínuos, com poucos artefatos, com as difrações colapsadas, e sem submigração (caso de velocidade de migração subdimensionada), nem sobremigração (caso de velocidade de migração subdimensionada). O empilhamento NMO foi remapeado para profundidade (Figura 6.13), utilizando o modelo em profundidade da Figura 6.8, através de uma interpolação linear e de uma extrapolação constante nos pontos marcados no mapa semblance para determinar as velocidades $v_{\text{INT}}(z)$ em intervalos temporais não especificados na seção.

Após a etapa de empilhamento foi realizado a migração Kirchhoff na profundidade (Figuras 6.14 e 6.15) usando os modelos das Figuras 6.5 e 6.8, onde se observa que as seções migradas possuem boa consistência, visto que as difrações foram colapsadas, os refletores

têm boa continuidade, as falhas geológicas foram corrigidas, os eventos em grandes profundidades se tornaram mais evidentes e não há arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”) (comparar com a seção migrada 6.41). Essa migração mostra seções com aparência melhor do que as migrações no tempo; isto é medido pela continuidade dos refletores. As melhoras foram alcançadas pelo controle das aberturas dos operadores de migração.

Observa-se que há um ganho de baixa frequência nas migrações no tempo e na profundidade. Além disso, comparando as seções obtidas (Figuras 6.6, 6.8, 6.12 e 6.15) com as informações originais (modelo de velocidade e respectivas migrações) (Figuras 6.4, 6.5, 6.11 e 6.14), se observa a necessidade de evoluir na direção de melhorar o empilhamento NMO e as migrações.

Os mapas de velocidade foram plotados no software computacional MATLAB e para realizar os empilhamentos e as migrações se fez uso do sistema CWP/SU através dos seguintes programas, e suas respectivas funções, mostrados na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Programas do sistema CWP/SU utilizados para realizar os empilhamentos e as migrações dos dados Marmousi e Jequitinhonha.

Programa	Função
suvelan	Análise de velocidade semblance
sunmo	Correção NMO
sustack	Empilhamento
sumute	Silenciamento
sugain	Aplicar ganho aos traços apresentados
suttoz	Remapear seção empilhada para profundidade
sumigtk	Migração Kirchhoff pós-empilhamento no tempo
velconv	Converter modelo de velocidade para profundidade
smooth2	Suavizar modelo de velocidade
sukdmig2d	Migração Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade

Figura 6.4: Modelo de velocidade de referência do Marmousi no domínio do tempo (Figura 6.2) suavizado a 20 pontos. Comparar com a Figura 6.6.

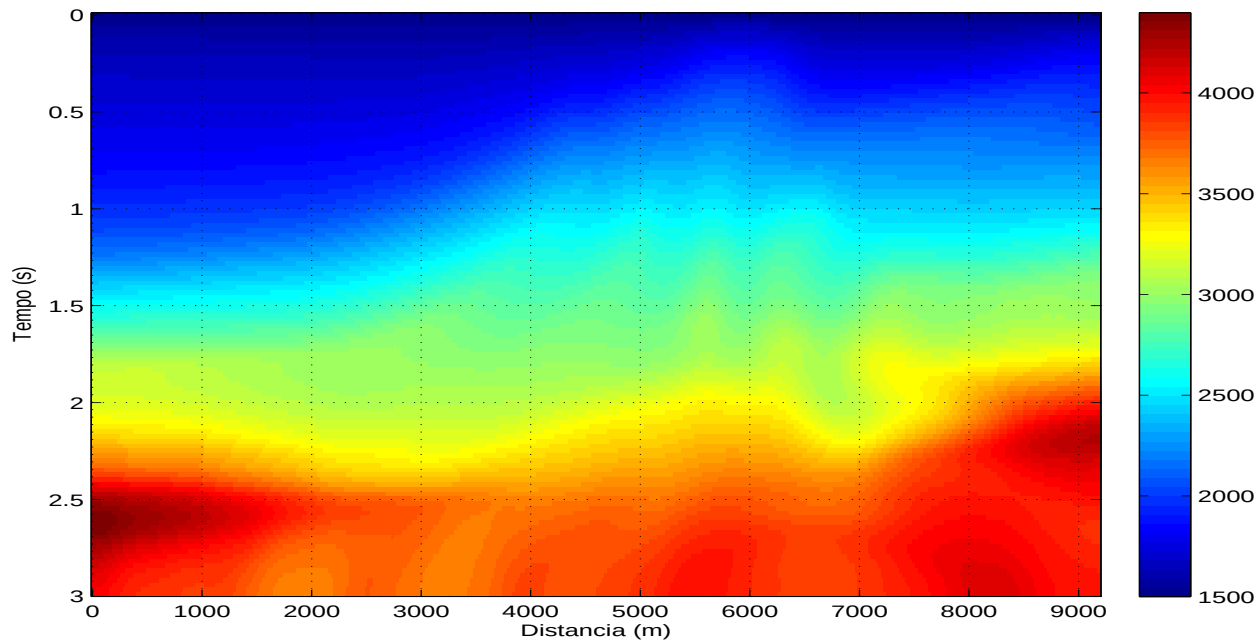


Figura 6.5: Modelo de velocidade de referência do Marmousi em profundidade, obtido a partir da Figura 6.4 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$. Comparar com a Figura 6.8.

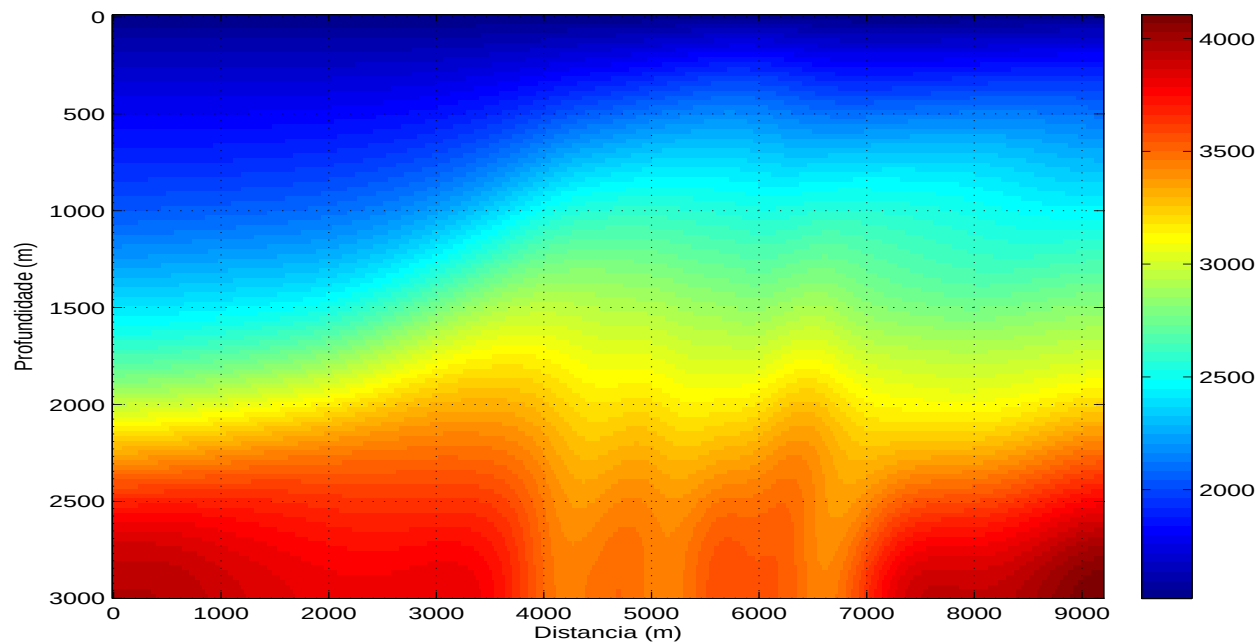


Figura 6.6: Mapa de distribuição de velocidades em tempo do Marmousi, suavizado à 20 pontos, obtido a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde cada CDP teve seu número de pontos marcados interpolado para o mesmo número de amostras. Observar o forte contraste de velocidade lateral.

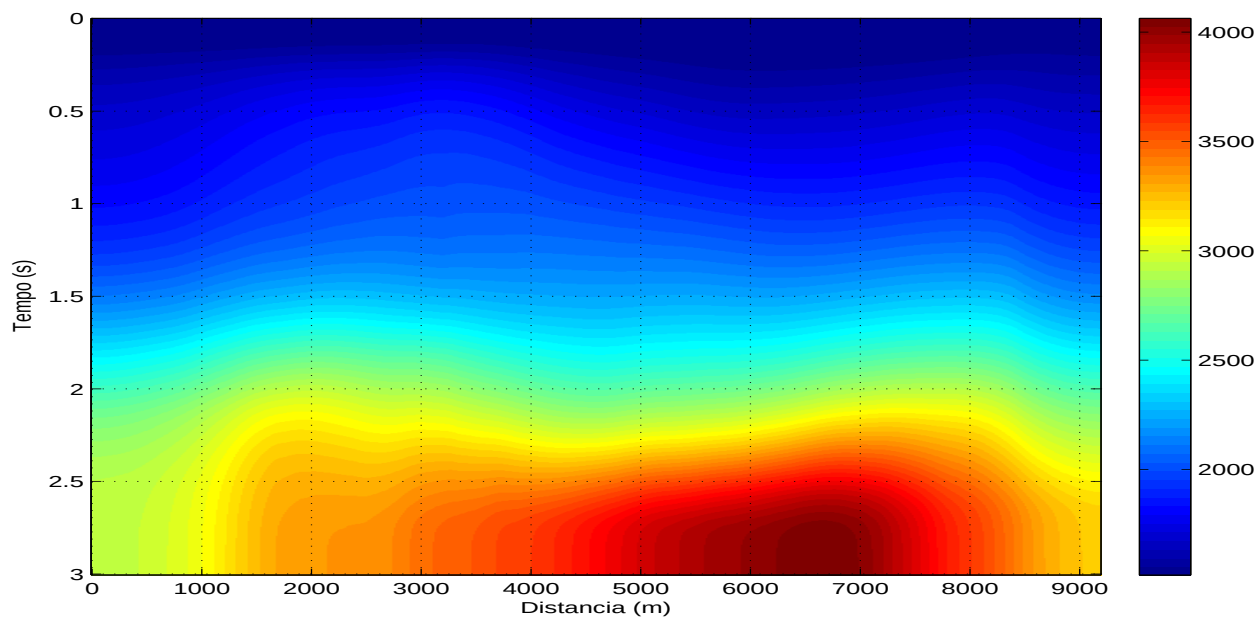


Figura 6.7: Figura 6.6 representada por mapas de contorno, onde se observa a boa visibilidade dos diferentes contrastes de velocidade.

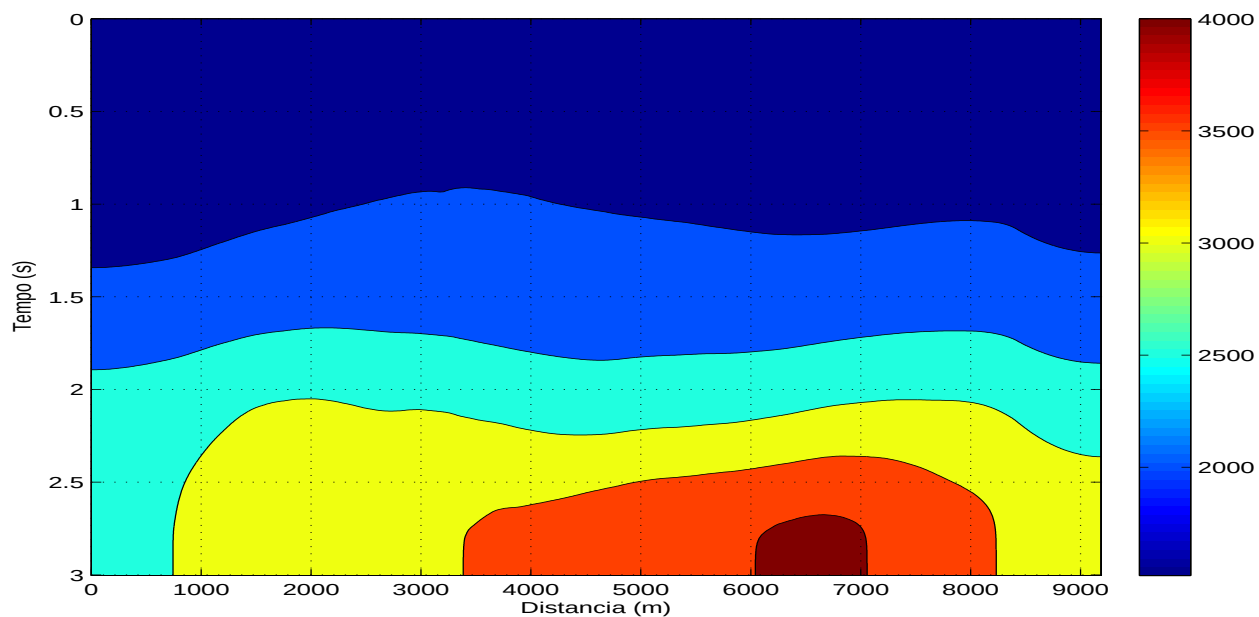


Figura 6.8: Mapa de distribuição de velocidades em profundidade do Marmousi, suavizado a 20 pontos, obtido a partir da Figura 6.6 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$.

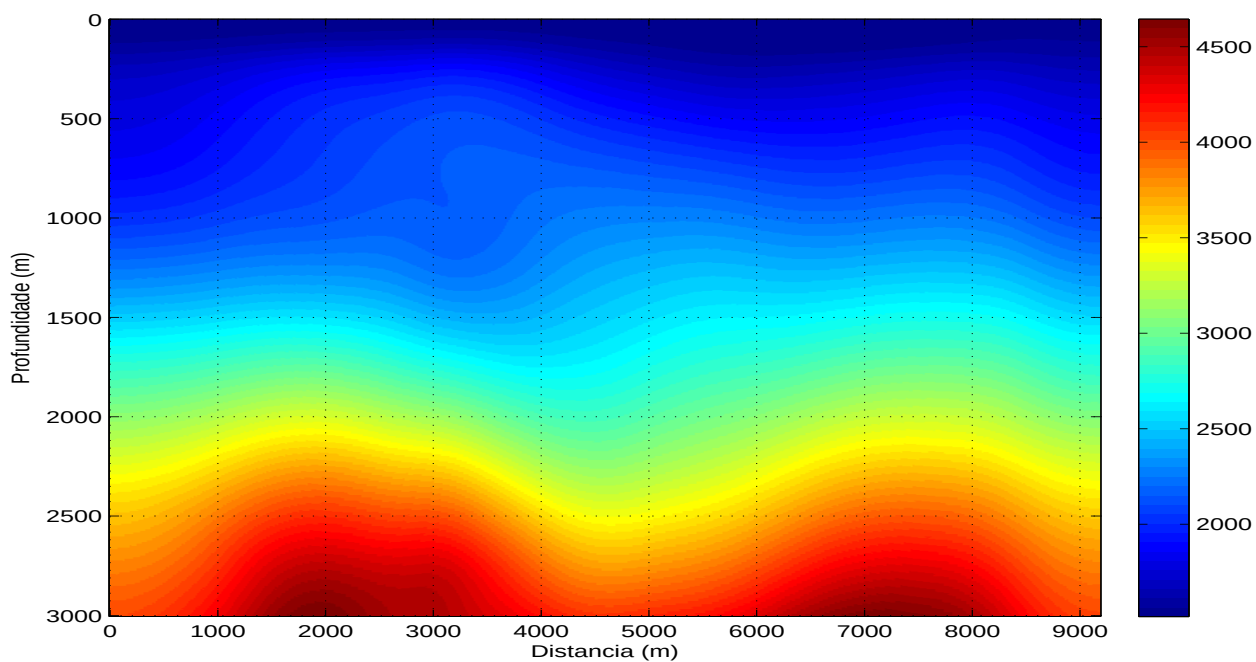


Figura 6.9: Figura 6.8 representada por mapas de contorno, onde se observa a boa visibilidade dos diferentes contrastes de velocidade.

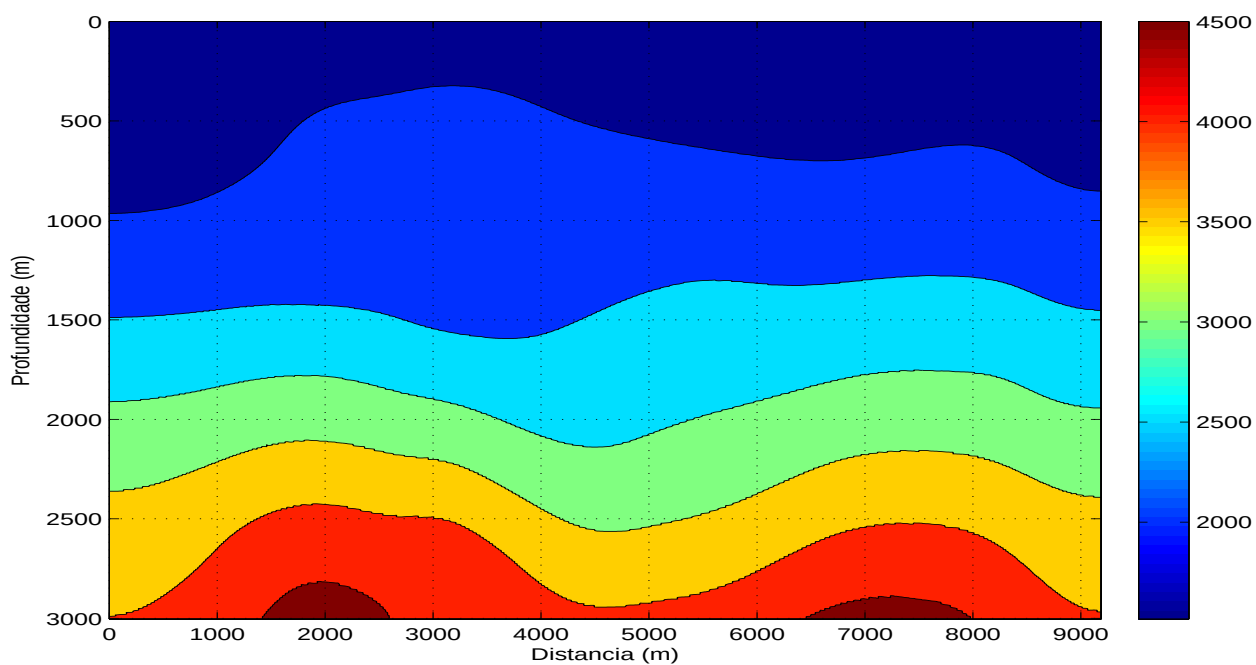


Figura 6.10: Seção empilhada NMO do Marmousi no tempo obtida a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde se observa as falhas geológicas nos refletores e as difrações nas regiões centrais do modelo.

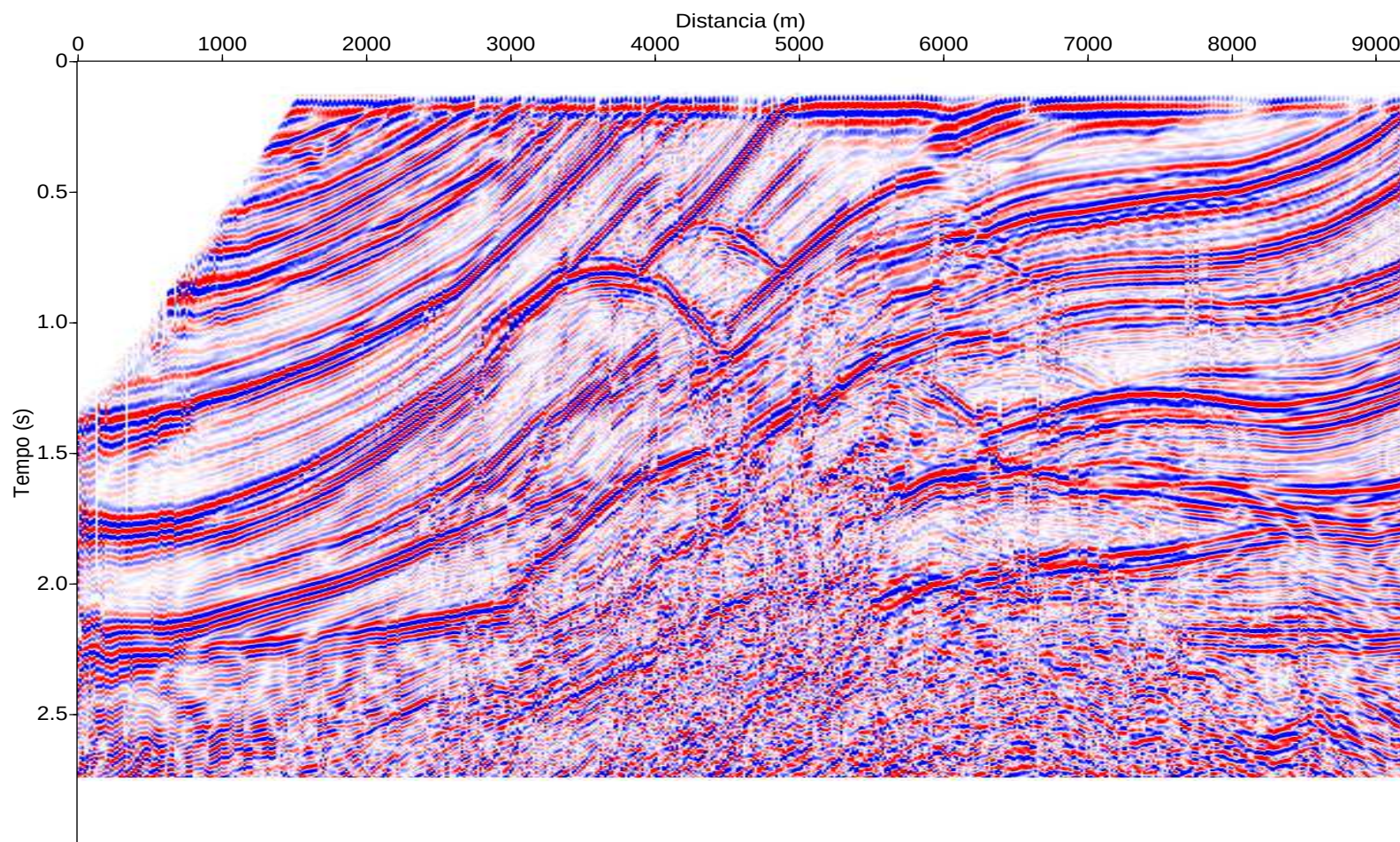


Figura 6.11: Seção migrada Kirchhoff no tempo, utilizando o modelo de velocidade de referência suavizado do Marmousi (Figura 6.4) sobre a seção empilhada NMO da Figura 6.10, onde se observa o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas e a recuperação de eventos em grandes profundidades. No entanto, se observa a presença de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”).

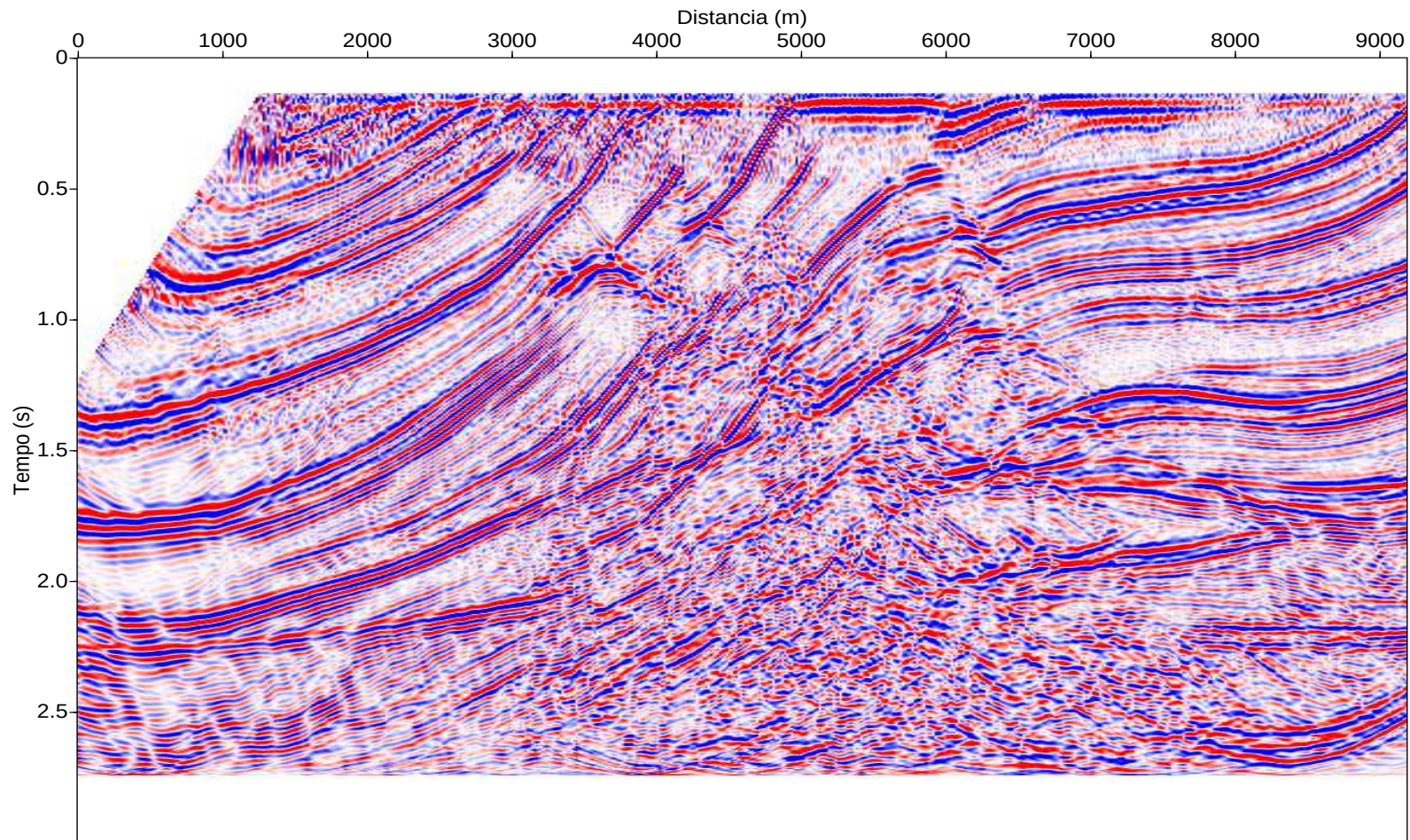


Figura 6.12: Seção migrada Kirchhoff no tempo, utilizando o modelo da Figura 6.6 sobre a seção empilhada NMO da Figura 6.10, onde se observa boa consistência com a migração da Figura 6.11, o que confirma a escolha da metodologia utilizada. Se observa que as difrações foram colapsadas, as falhas geológicas corrigidas e os eventos em grandes profundidades recuperados, contudo ainda há arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”).

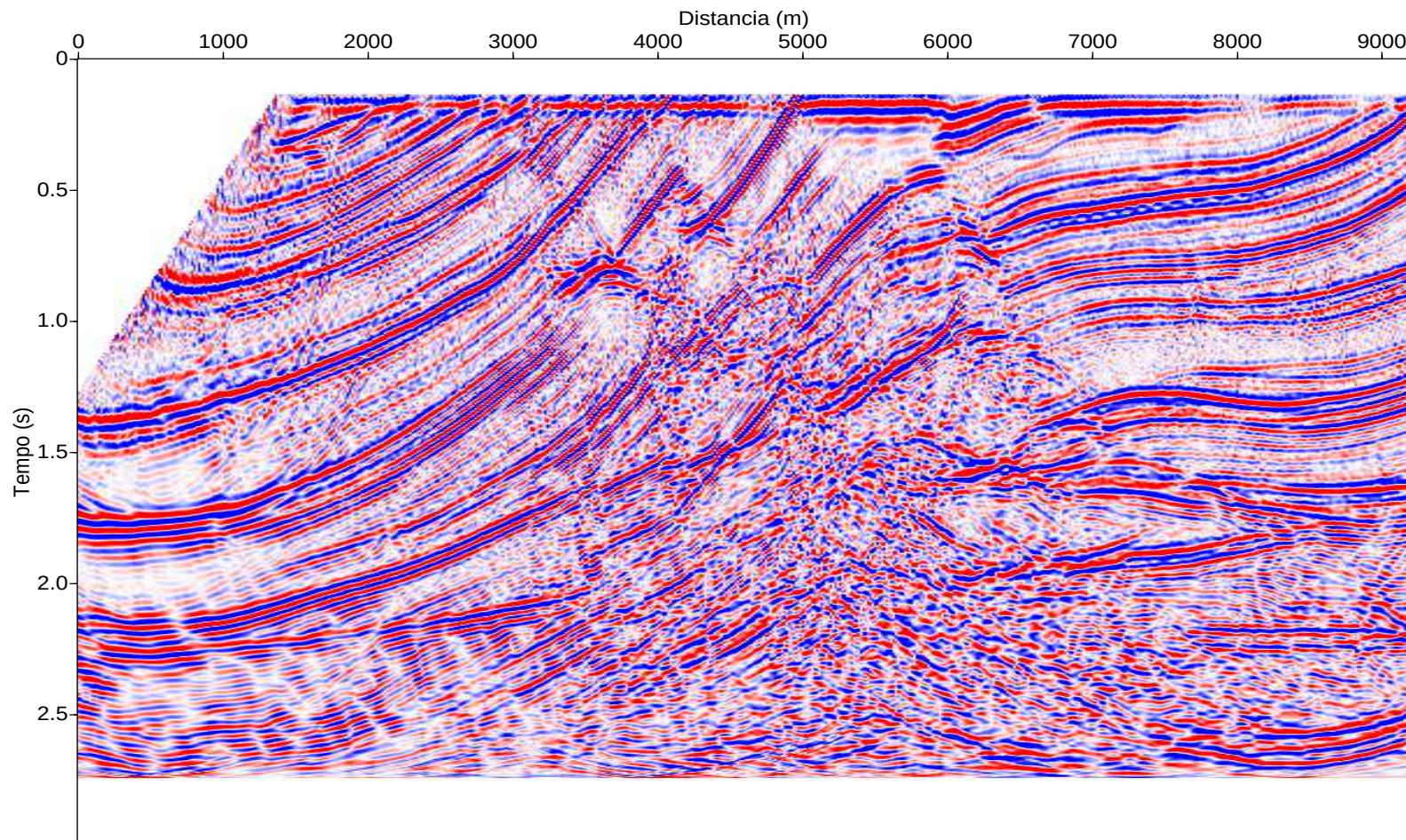


Figura 6.13: Seção empilhada NMO do Marmousi (Figura 6.10) remapeada para profundidade, utilizando o modelo de velocidade em profundidade da Figura 6.8, através de uma interpolação linear e de uma extrapolação constante nos pontos marcados no mapa semblance para determinar as velocidades $v_{\text{INT}}(z)$ em intervalos de tempo não especificados.

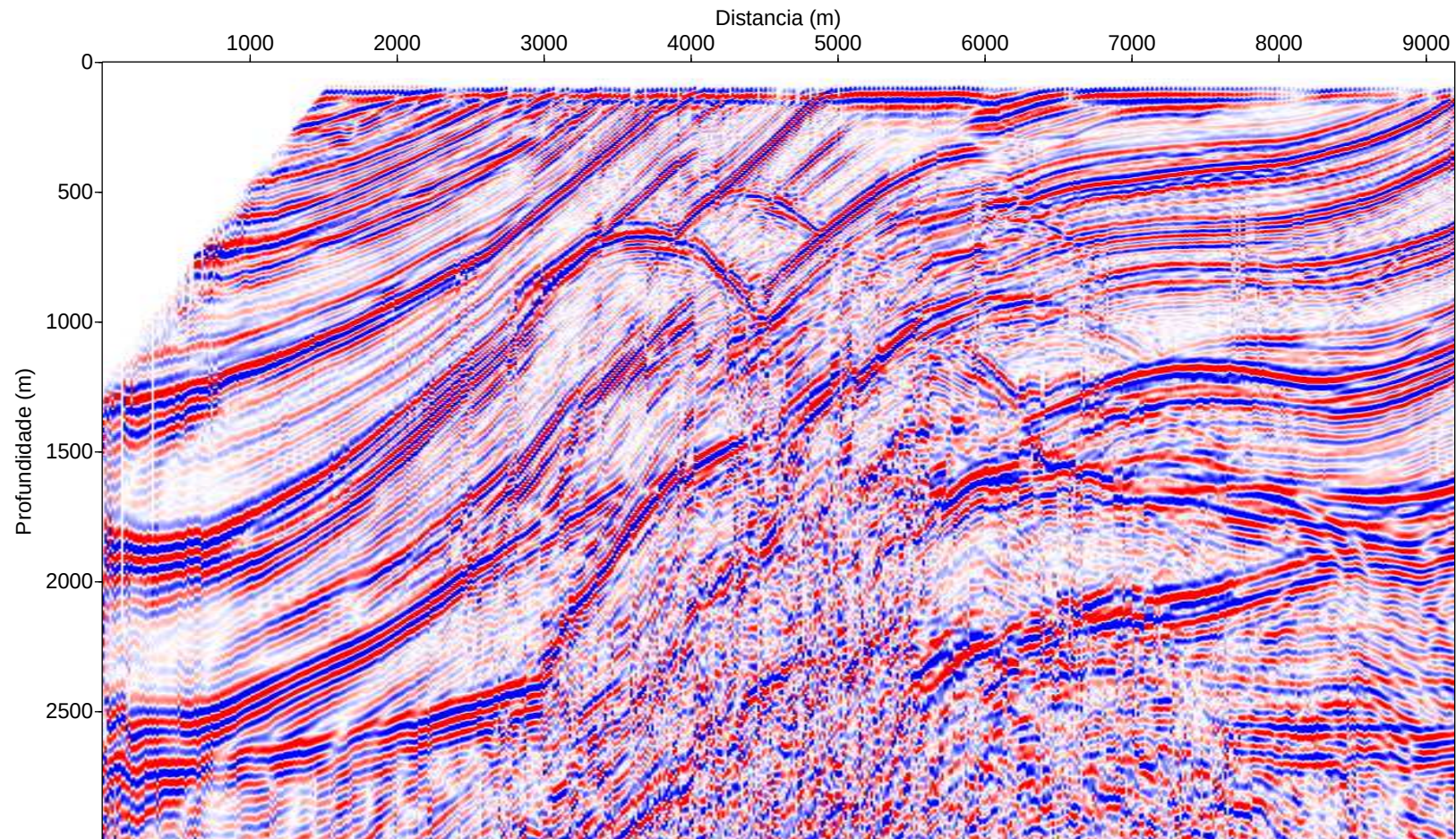


Figura 6.14: Seção migrada Kirchhoff na profundidade utilizando o modelo da Figura 6.5 sobre a seção empilhada NMO (Figura 6.10), onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a recuperação de eventos em grandes profundidades e a ausência de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”), demonstrando melhor qualidade da seção em relação à migração Kirchhoff no tempo. A comparação com a Figura 6.15 mostra melhor horizontalização dos eventos refletores em grandes profundidades. O parâmetro de abertura lateral usado foi 300m.

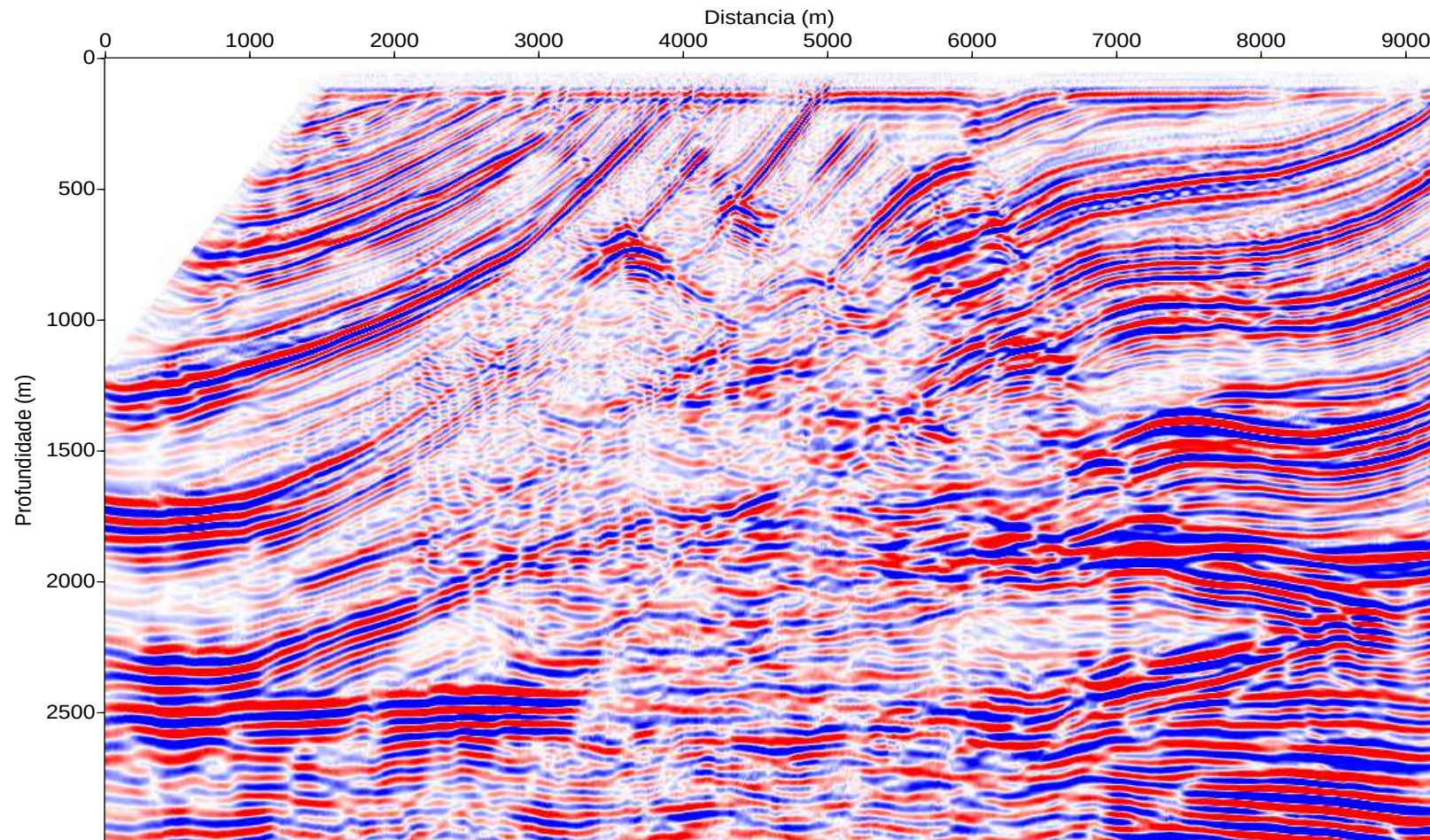
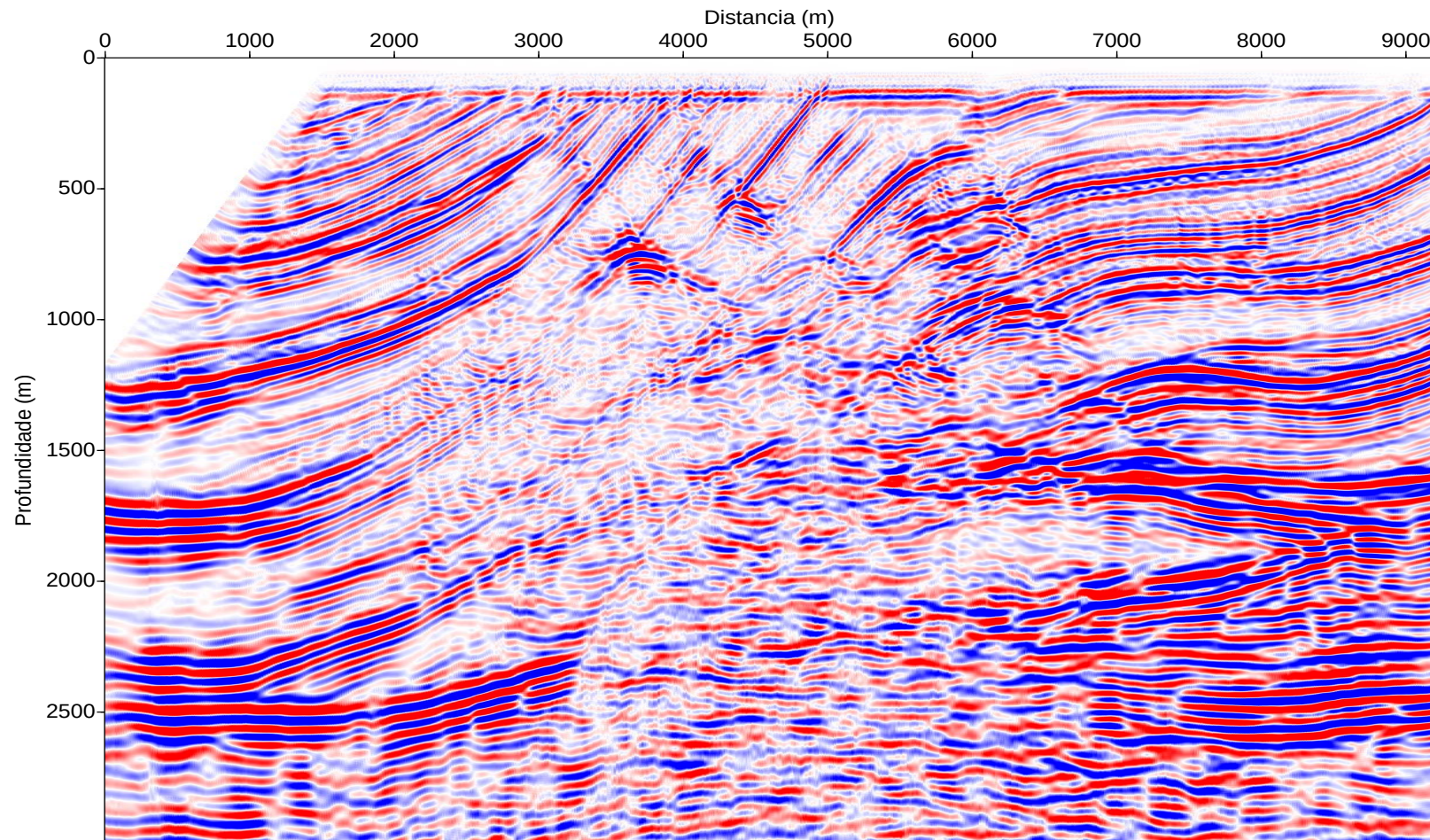


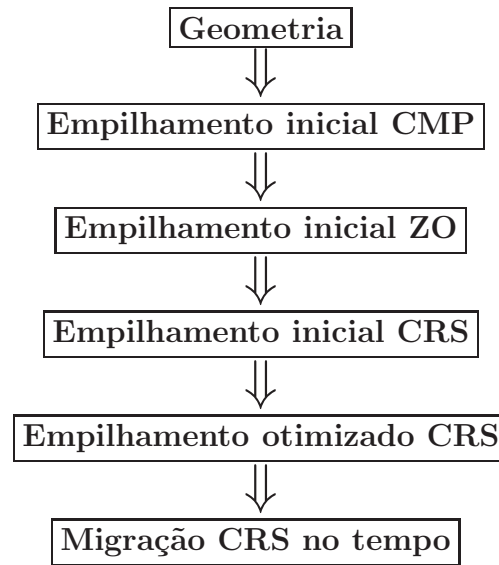
Figura 6.15: Seção migrada Kirchhoff na profundidade utilizando o modelo de velocidade da Figura 6.8 sobre a seção empilhada NMO (Figura 6.10), onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a recuperação de eventos em grandes profundidades e a ausência de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”), demonstrando a melhor qualidade desta seção em relação à migração Kirchhoff no tempo. O parâmetro de abertura lateral usado foi 300m.



6.2.2 Empilhamento CRS-2D

O processamento do dado Marmousi com o método de empilhamento sísmico CRS é descrito através do fluxograma da Figura 6.16.

Figura 6.16: Fluxograma do empilhamento CRS aplicado ao modelo Marmousi.



A tabela 6.4 apresenta os parâmetros de processamento gerais utilizados para efetuar as sucessivas etapas do fluxograma acima.

Tabela 6.4: Parâmetros utilizados para simulação ZO pelo empilhamento CRS.

Parâmetros gerais	Valores
Medida de coerência	Semblance
Dado usado para análise de coerência	Traços normalizados
Velocidade e vínculos	Valores
Velocidade constante na superfície	$1500m/s$
Velocidades de empilhamento testadas	$1400m/s$ à $6000m/s$
Zona alvo	Valores
Tempos de trânsito para simulação ZO	$0s$ à $3.0s$
Intervalo de amostragem temporal simulada	$4ms$
Número de traços ZO simulados	23040

Espaçamento entre traços ZO simulados	12.5m
Aberturas e suavização	Valores
Mínima abertura ZO	50m em 0.0s
Máxima abertura ZO	500m em 3.0s
Mínima abertura CMP	-2575m em 0.0s
Máxima abertura CMP	-200 m em 3.0s
Tamanho relativo à suavização	30 %
Busca automática de v_{EMP} em famílias CDP	Valores
Incremento no sobretempo inicial para grandes afastamentos	4ms
Número de iterações para o refinamento	3
Busca de β_0 e R_{NIP} na seção empilhada	Valores
Ângulos de emergência testados	-60° à 60°
Incremento do ângulo de emergência	1°
Número de iterações para o refinamento	3
Busca de R_{N} na seção empilhada	Valores
Incremento no sobretempo inicial para grandes afastamentos	4ms
Número de iterações para o refinamento	3
Deteção de mergulhos conflitantes	Valores
Número máximo de mergulhos conflitantes	2
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	0.01
Limite de coerência para tempos de trânsito grandes	0.003
Número máximo de iterações na otimização	100
Desvio máximo relativo para parada	10^{-4}
Variação inicial dos ângulos de emergência	10°
Variação inicial de R_{NIP}	35.8 %
Variação inicial de R_{N} transformado	10°
Raio de transformação de R_{N}	100m

De acordo com o fluxograma da Figura 6.16, a aplicação do método CRS resulta nas

seguintes seções CRS: otimizada (Figura 6.17); otimizada migrada (Figura 6.18); coerência (Figura 6.20); ângulo de emergência β^1 (Figura 6.21); R_N (Figura 6.22); e R_{NIP} (Figura 6.23).

O resultado do empilhamento CRS otimizado é mostrado na Figura 6.17, onde é possível visualizar melhor a continuidade dos eventos, percebe-se uma significativa melhora com relação ao ruído e para grandes profundidades os eventos são bem mais visíveis quando comparados com a Figura 6.10. A Figura 6.18, mostra o resultado da migração CRS no tempo baseada nos atributos do campo de onda, e se observa que as difrações evidentes na Figura 6.17 foram colapsadas, não há arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), se obtendo assim um resultado mais expressivo da subsuperfície. Entretanto, a seção migrada tem uma aparência granulada, e para diminuir este efeito se propõe realizar uma suavização dos atributos antes da etapa de migração e aplicar ao fluxograma da Figura 6.16 as etapas de Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-Empilhamento visando aumentar a relação sinal/ruído.

À seção empilhada CRS otimizada da Figura 6.17 foi aplicado o modelo de velocidade obtido através da análise do mapa de coerência semblance no domínio do tempo (Figura 6.6) e foi obtida a seção migrada Kirchhoff em tempo da Figura 6.19, onde se mostra o colapso das difrações e poucos arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), principalmente para eventos em grandes profundidades. A comparação com a Figura 6.18 mostra uma maior qualidade visual em relação aos eventos refletos e a redução da granulação. É importante ressaltar que nas seções empilhadas e migradas a abertura ZO foi restrita à Primeira Zona de Fresnel Projetada e um ganho *agc* (*automatic gain control*), com uma janela temporal de 0.5s, foi aplicado para melhorar a visualização dos resultados (revelar eventos com baixa amplitude).

A seção coerência da Figura 6.20 mostra os eventos dominantes associados aos maiores valores de coerência que tem um máximo ao redor de 0.9. As seções ângulo de emergência e raio de curvatura da onda N são mostradas nas Figuras 6.21 e 6.22, respectivamente. Elas mostram claramente a separação entre as zonas de difração e de reflexão, e ambas estão diretamente relacionadas à mergulhos e curvaturas de eventos. A seção ângulo de emergência (Figura 6.21) apresenta como característica fortes difrações na janela central da seção.

A seção raio de curvatura da onda NIP é apresentada na Figura 6.23, e mostra a estratificação da distribuição crescente do raio com o aumento do tempo de trânsito. A seção se mostra ruidosa para grandes valores do tempo de trânsito.

¹A unidade dos valores dos ângulos de emergência é o grau, e a unidade para os valores de raios de curvaturas das frentes de onda N e NIP é o metro.

Figura 6.17: Seção empilhada CRS otimizada do Marmousi, onde se observa grande evolução na qualidade visual da seção em relação a Figura 6.10 devido ao aumento da relação sinal/ruído, da melhor continuidade dos eventos refletivos e da recuperação de eventos em grandes profundidades.

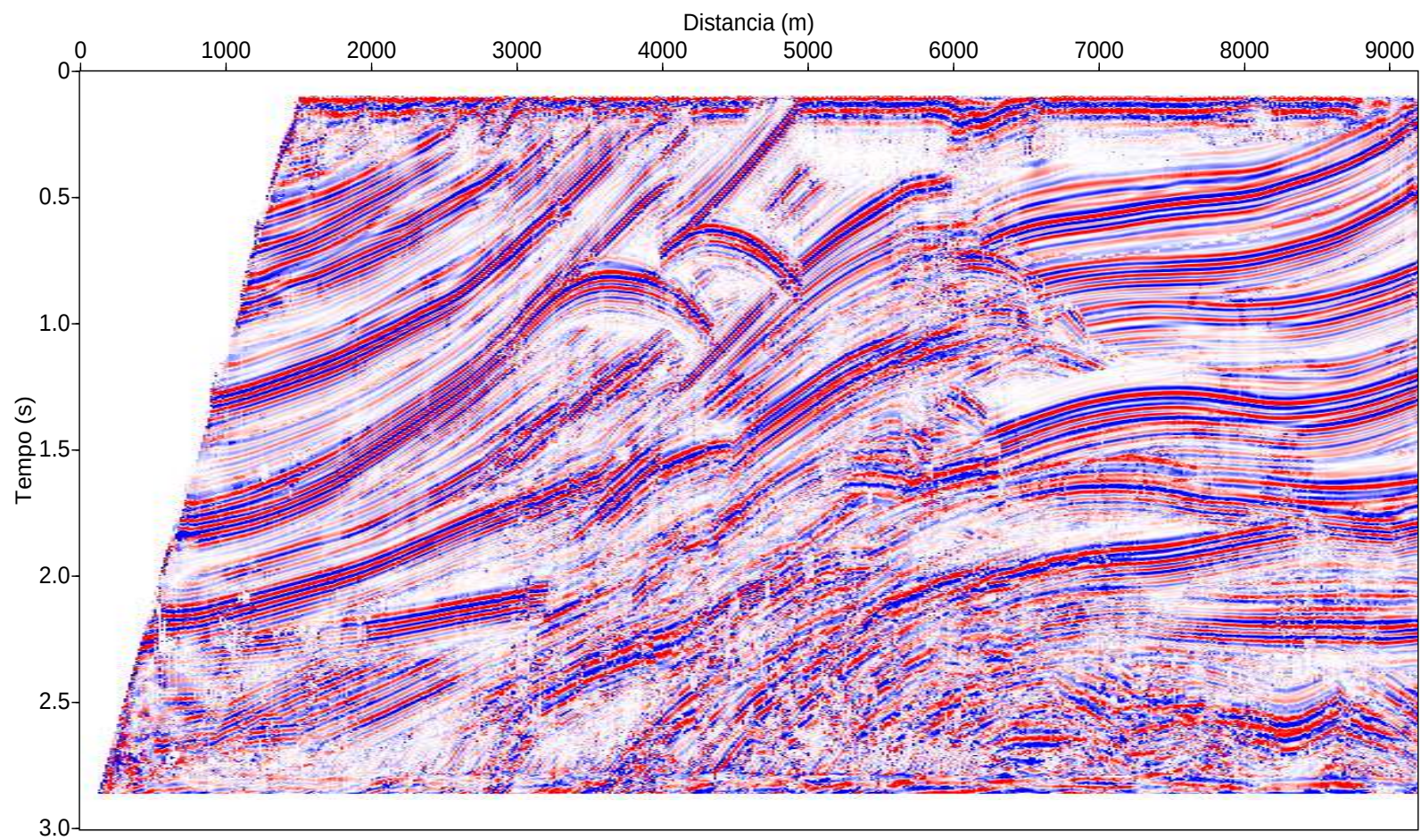


Figura 6.18: Seção empilhada CRS-migrada do Marmousi, onde se observa o colapso das difrações evidentes na Figura 6.17, a ausência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”) e o forte aspecto granuloso, principalmente nas regiões centrais e mais profundas da seção. Comparar com a Figura 6.12.

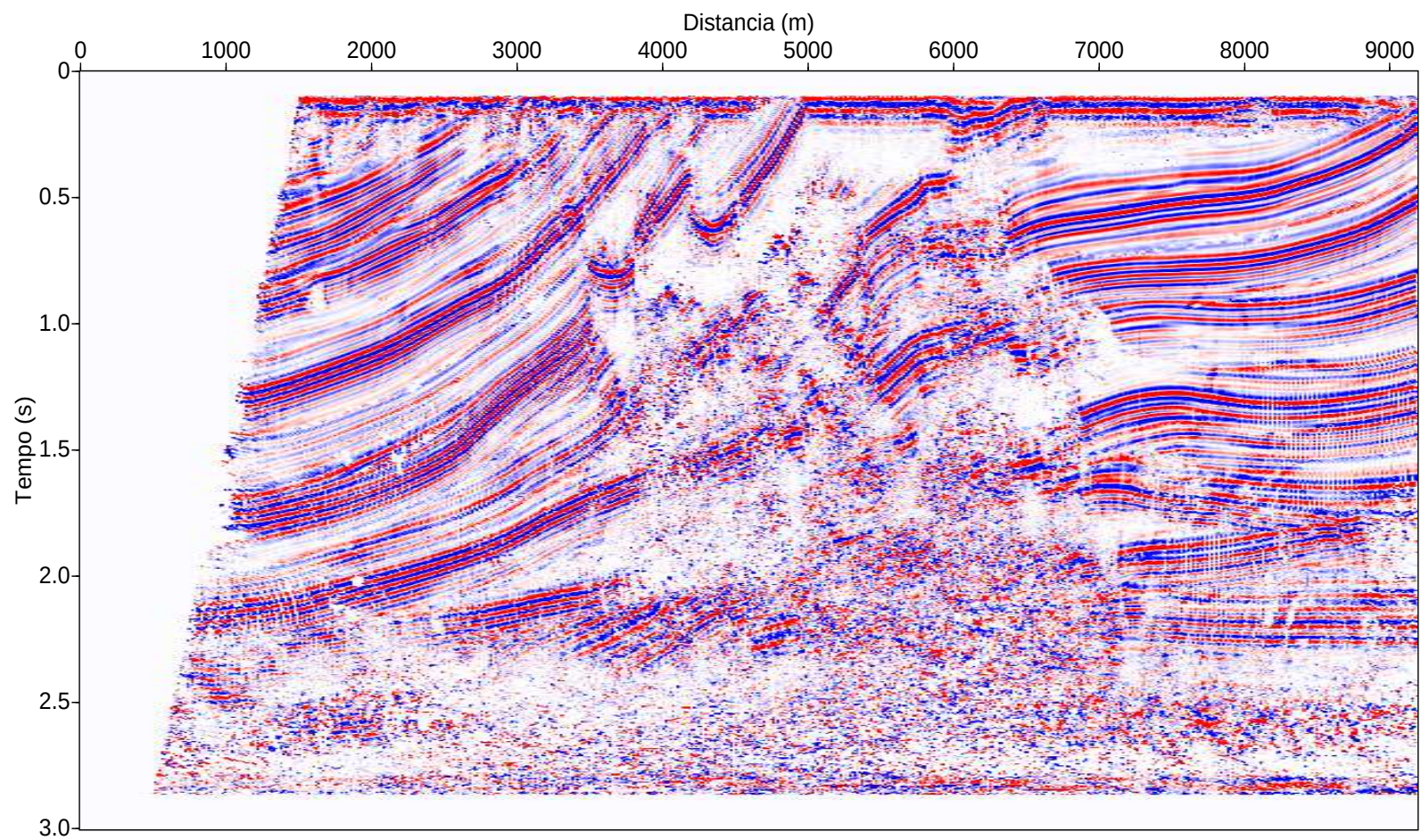


Figura 6.19: Migração Kirchhoff no tempo utilizando o modelo de velocidade semblance (Figura 6.6) e a seção empilhada CRS otimizada (Figura 6.17), onde se observa que as difrações foram colapsadas e que há muitos arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). A comparação com a Figura 6.18 mostra uma maior qualidade visual em relação aos eventos refletidos e a redução da granulação devido ao aumento da relação sinal/ruído.

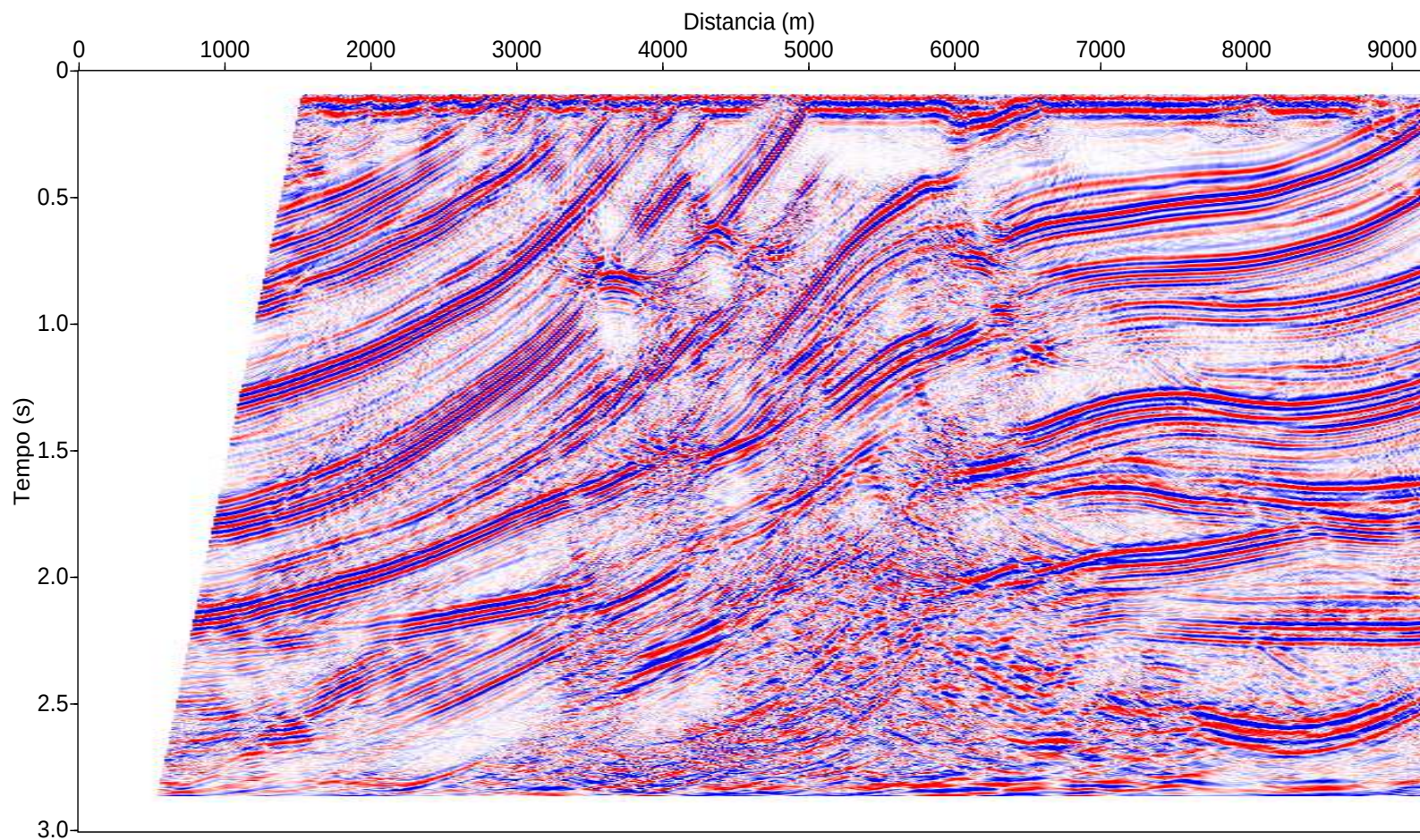


Figura 6.20: Seção Coerência do empilhamento CRS otimizado do Marmousi usando o mapa semblance.

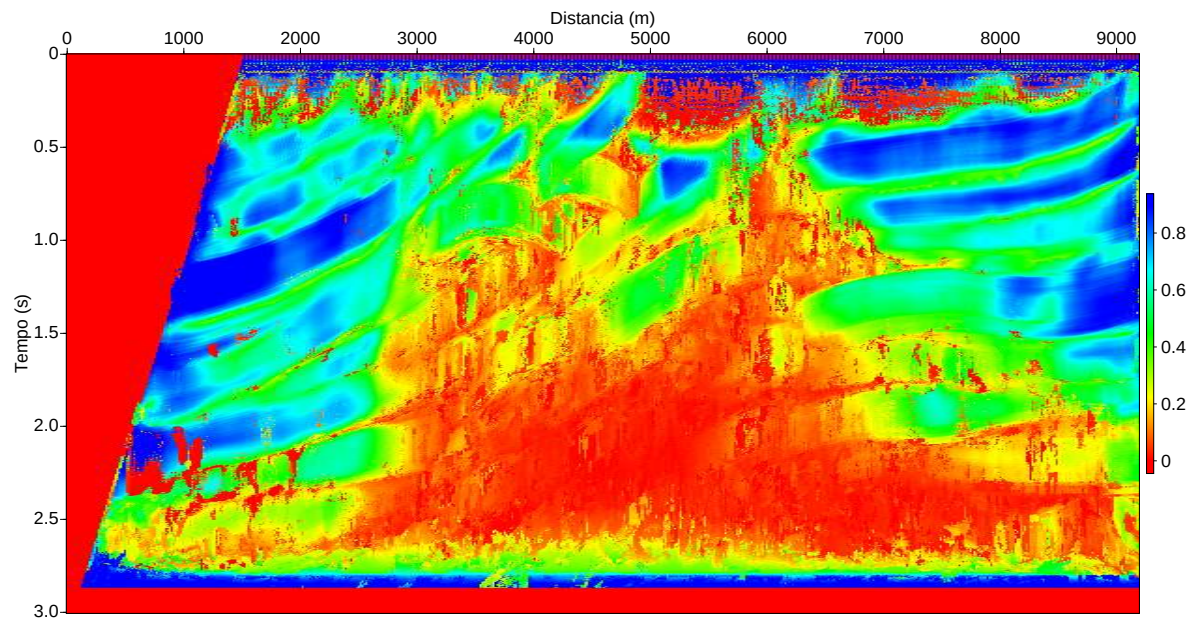


Figura 6.21: Seção Ângulo de Emergência β_0 (em graus) do empilhamento CRS do Marmousi.

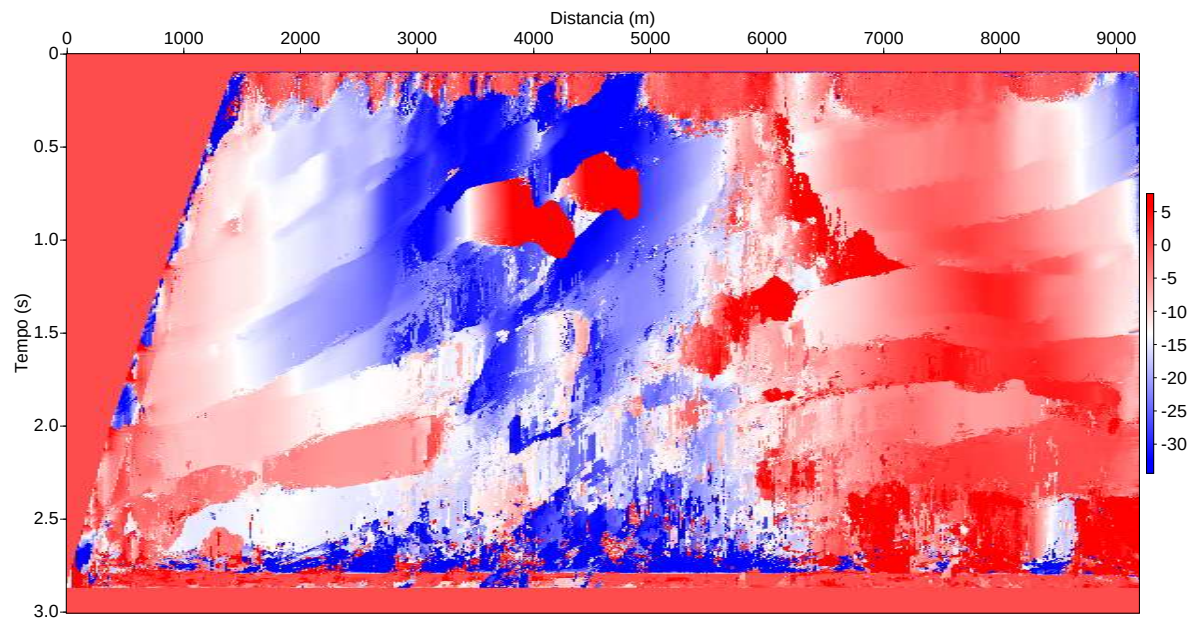


Figura 6.22: Seção raio de curvatura R_N (em m^{-1}) do empilhamento CRS do Marmousi.

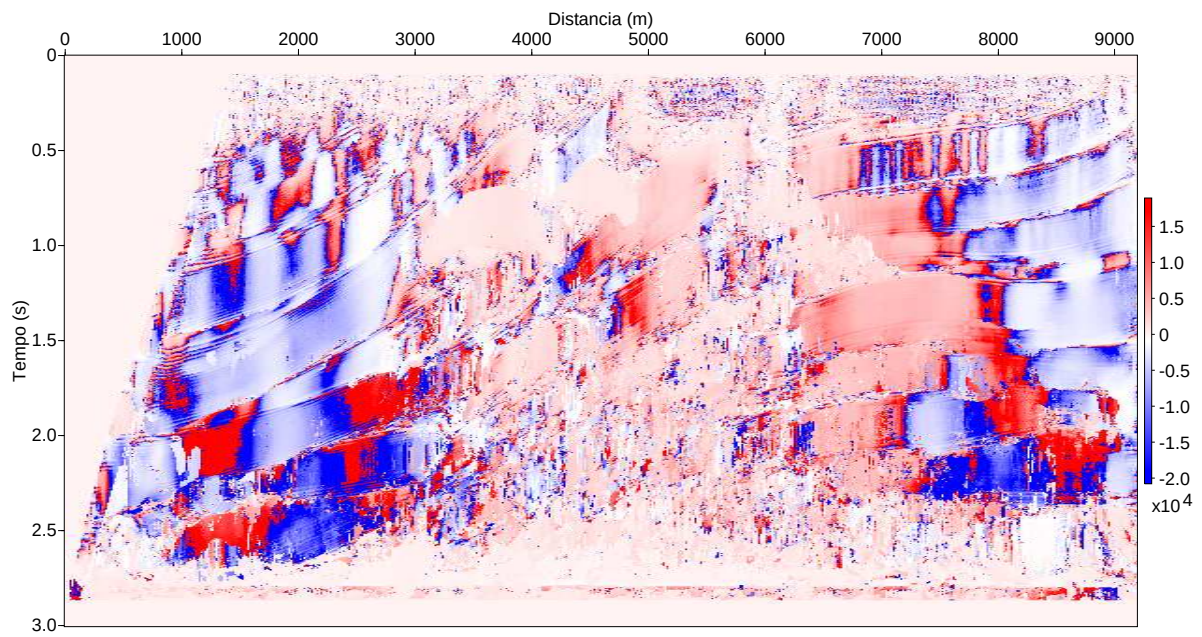
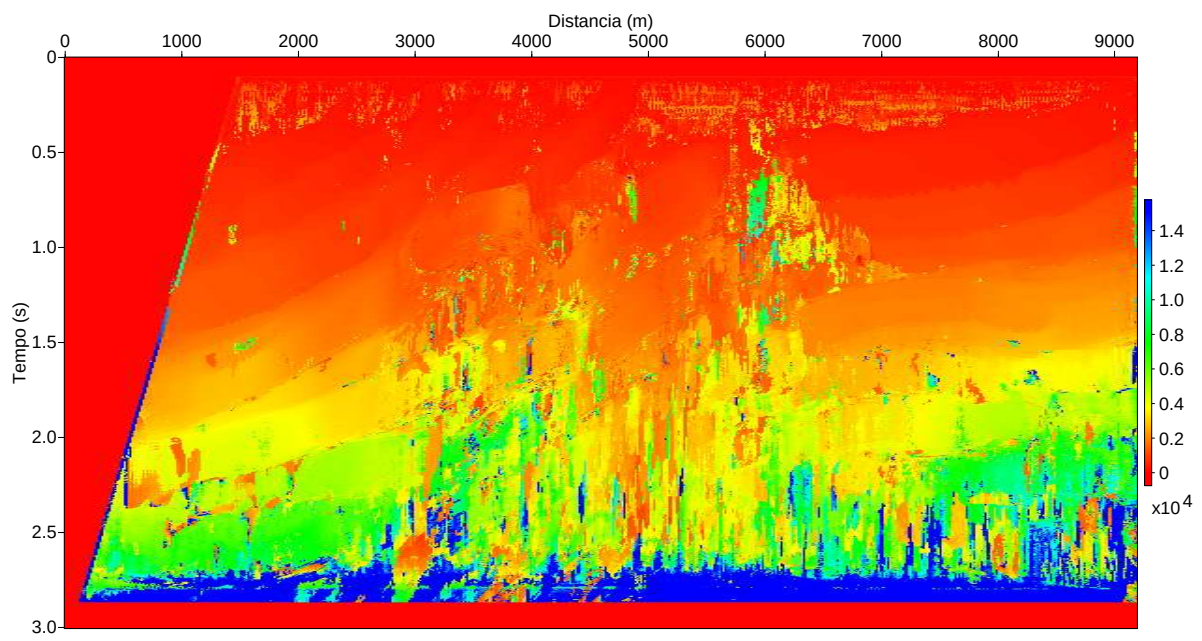


Figura 6.23: Seção raio de curvatura R_{NIP} (em m) do empilhamento CRS do Marmousi.



6.3 NIPTOMOGRAFIA 2D

Nesta e na seção 7.3 são mostrados os resultados obtidos através da aplicação da metodologia de inversão tomográfica da onda NIP utilizando duas aplicações diferentes para se obter os modelos de velocidade e, posteriormente, as seções migradas, objetivando comparar os modelos de velocidade niptomográfico finais e as migrações entre si e com as respectivas seções obtidas dos processamentos NMO e CRS. Na primeira maneira foi utilizado o modelo inicial de velocidade linear, criado a partir dos parâmetros $xknots$, $zknots$, v_0 e $grad_0$, enquanto que na segunda foi usado o modelo inicial de velocidade semblance reamostrado como entrada, através do parâmetro $vinput$ em vez de v_0 e $grad_0$.

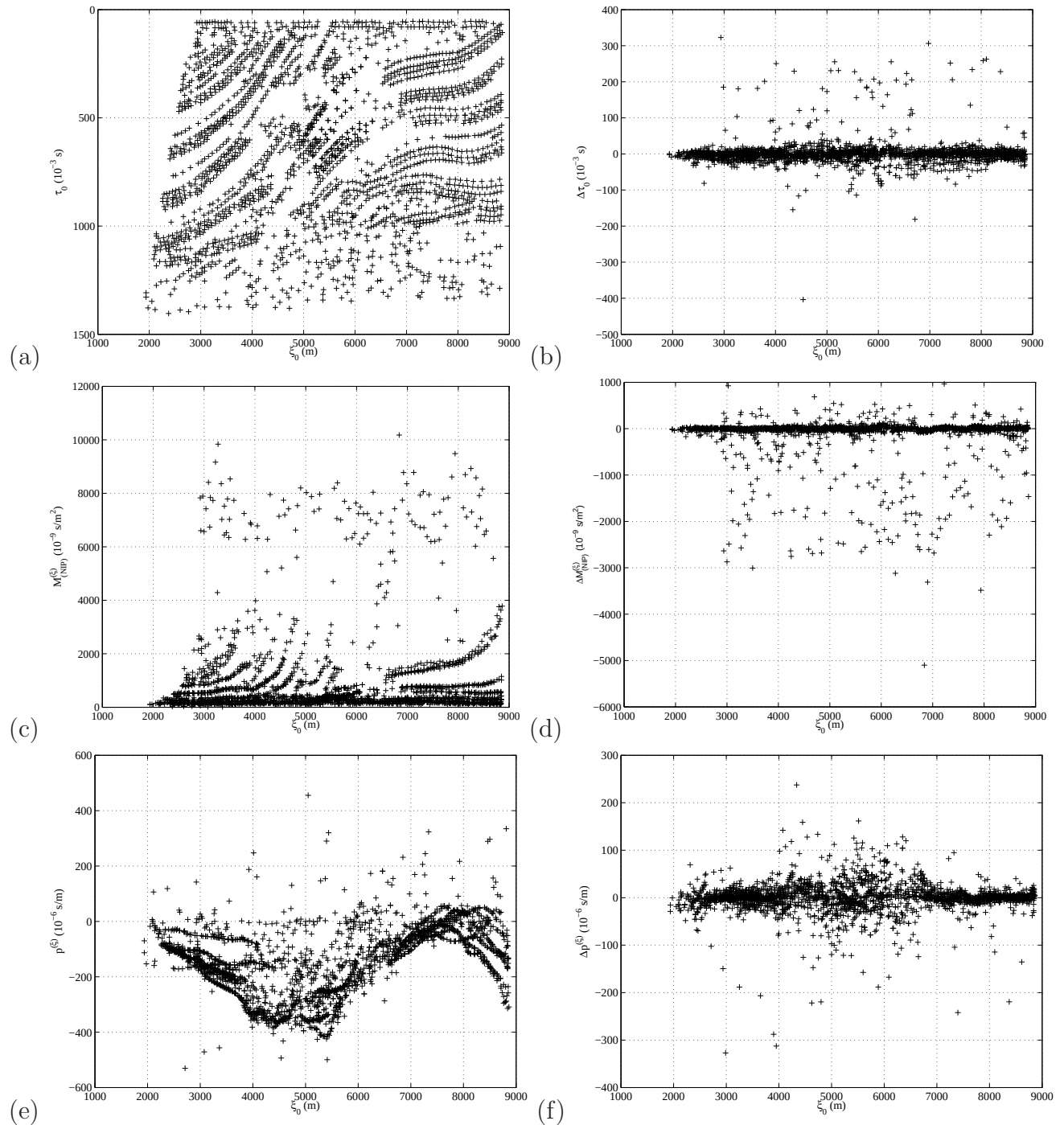
6.3.1 Modelo Inicial Linear

A metodologia de inversão tomográfica da onda NIP, descrita no fluxograma da Figura 5.4, necessita dos atributos extraídos automaticamente do empilhamento CRS (Figuras 6.17, 6.20, 6.21 e 6.23), discutidos na subseção 6.2.2, para obter os parâmetros dos dados de entrada para a inversão. Utilizando a seção empilhada CRS otimizada do modelo Marmousi (Figura 6.17), foi realizada a primeira etapa da niptomografia, que consiste na marcação manual dos eventos de reflexões primárias. Este processo resultou em 2276 pontos no domínio (τ_0, ξ_0) , cuja interpretação deve necessariamente evitar múltiplas e difrações.

O conjunto de equações (3.16), calculados a partir dos valores extraídos de R_{NIP} e β_0 da equação do tempo de trânsito hipérbolico para a situação de afastamento-comum (3.14), fornecem as componentes dos dados resultantes, $(\tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)})$, que são plotadas como uma função da localização de emergência ξ_0 (a quarta componente dos dados) nas Figuras 6.24a, 6.24c e 6.24e.

O sistema CWP/SU e o software computacional MATLAB foram utilizados para gerar as respectivas seções sísmicas.

Figura 6.24: Dados de entrada e controle de qualidade da niptomografia. (a) Pontos que compõem os dados na inversão niptomográfica. (b) Erros residuais em τ_0 para 8 iterações. (c) Valores do componente $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ usado na inversão niptomográfica. (d) Erros residuais em $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ para 8 iterações. (e) Valores do componente do dado $p^{(\xi)}$ usado na inversão niptomográfica. (f) Erros residuais em $p^{(\xi)}$ para 8 iterações.



(DUVENECK, 2004) mostra que o fato dos diferentes componentes dos dados de entrada variarem suavemente ao longo dos eventos de reflexão permite que sejam considerados seguros e utilizados na inversão. Como as 2276 marcações feitas na seção ZO do Marmousi se encaixaram nesses requisitos se utilizou tais pontos como entrada para a niptomografia.

O modelo de velocidade foi definido por uma malha de $n_x \times n_z = 42 \times 19 = 798$ nós B-spline, com um espaçamento horizontal e vertical constante de $250m$ entre nós. As coordenadas da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) variam de $x = 1713m$ a $x = 8875m$ na horizontal e de $z = 0$ a $z = 3000m$ na vertical. Para se evitar que o efeito de borda distorcesse a qualidade dos resultados, se acrescentou um valor de $1500m$ em cada limite da malha do modelo de velocidade a ser criado (DUVENECK, 2004), dessa maneira este foi plotado em uma malha com aproximadamente $10450m$ de distância por $4500m$ de profundidade. Para o modelo inicial, usou-se $1500m/s$ para a velocidade inicial e um gradiente de velocidade vertical constante igual a $k = 0.84s^{-1}$ numa função linear $v(t) = v_0 + k\Delta z$.

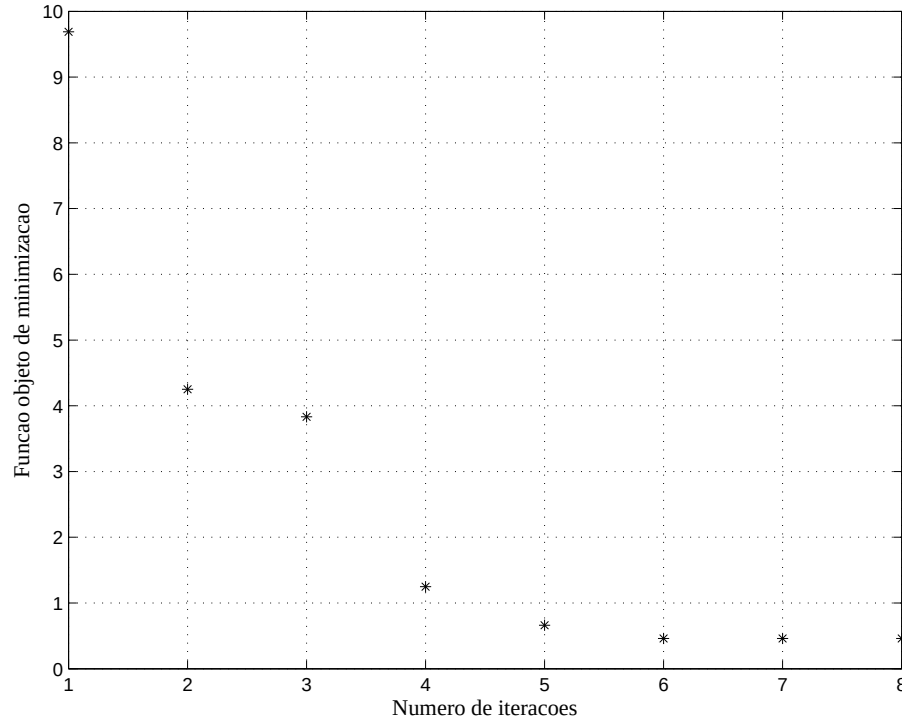
Os fatores de regularização finais adotados foram $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = 0.0005$, e um peso de regularização global que, para a $(n + 1)$ -ésima iteração, decresce iterativamente passo-a-passo e é dado pela relação heurística:

$$\varepsilon''_{n+1} = \sqrt{\frac{S_n}{S_{n-1}}} \varepsilon''_n, \quad (6.1)$$

onde S_n é o valor da função objeto de minimização após n iterações. Os valores para os fatores de escala (elementos da matriz diagonal covariante dos dados $\mathbf{C}_D$) são: $\sigma_\tau = 1$, $\sigma_M = 1$, $\sigma_p = 2$, e $\sigma_\xi = 1$. Os pesos dos vínculos adicionais introduzidos para reduzir a ambigüidade do problema de inversão são $\sigma_v = 1$ e $\sigma_{vq} = 0$.

Com estes parâmetros foram executadas 8 iterações inversas não-lineares mostradas na Figura 6.25, onde se observa a evolução da função objeto de minimização em função do número de iterações. Tal função minimiza o desajuste entre os parâmetros dos dados de entrada e os do modelo, além do que praticamente se estabiliza a partir da 6ª iteração e obtém seu mínimo valor, igual a 0.459701, na 8ª iteração.

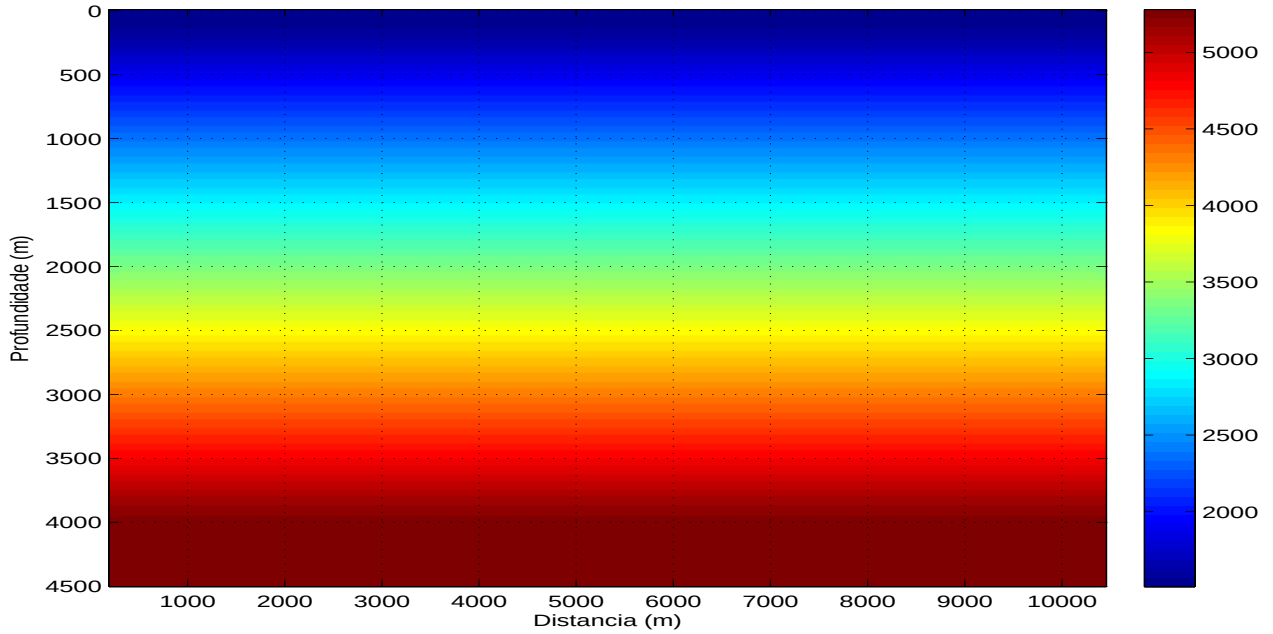
Figura 6.25: Gráfico da função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações do processo inverso. O total de iterações usadas para se obter o modelo de velocidade final foi 8, onde se observa que a função objeto se estabiliza a partir da iteração de número 6 e alcança seu mínimo valor em 0.459701.



Os desajustes residuais finais nos componentes dos dados τ_0 , $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ e $p^{(\xi)}$ depois de 8 iterações, em função da localização do ponto de emergência ξ_0 , são mostrados nas Figuras 6.24b, 6.24d e 6.24f. Com o objetivo de avaliar esses erros dos dados residuais, eles precisam ser interpretados em termos das magnitudes de erros de medida que seriam esperadas se os componentes dos dados forem determinados do dado sísmico pré-empilhado com uma análise de coerência e extraídos dos resultados do empilhamento CRS nas localizações dos picks selecionados. Um parâmetro de suavização igual a 10 pontos na direção vertical e 50 pontos na direção horizontal foi aplicado ao modelo de velocidade final.

A Figura 6.26 mostra o mapa de distribuição de velocidade inicial do Marmousi, plotado com o acréscimo de 1500m aplicado em cada extremidade da malha para evitar efeitos de borda, estimado pela atribuição de valores significativos para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$, bem como da especificação dos fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados, dos pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , do gradiente de velocidade vertical constante k , da velocidade inicial v_0 e dos fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε .

Figura 6.26: Distribuição de velocidades inicial estimada pela atribuição de valores para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$, bem como da especificação dos fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados, dos pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , do gradiente de velocidade vertical constante k , da velocidade inicial v_0 e dos fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε .



Nas Figuras 6.27 e 6.28 estão exibidos os resultados do modelo de velocidade niptomográfico final, onde a malha do modelo utilizado possui 10450m de comprimento por 4500m de profundidade. Se observa a grande complexidade do modelo devido ao seu forte contraste de velocidade lateral/vertical e as curvas de nível ilustrando as diferentes distribuições de velocidade.

As Figuras 6.29 e 6.30 mostram os 2276 pontos de incidência normal sobrepostos ao modelo de velocidade, representando os elementos refletor locais, obtidos a partir de marcações manuais feitas sobre a seção empilhada CRS otimizada e calculados através dos parâmetros dos dados de entrada $(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)$ para a inversão. Os elementos refletor locais seguem a estrutura da subsuperfície real muito bem. O mapa de distribuição de velocidades possui 10450m de comprimento por 4500m de profundidade.

As Figuras 6.31 e 6.32 mostram o traçamento dos 2276 raios normais correspondendo aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)^{(\text{NIP})}$ final. O mapa de distribuição de velocidades possui 10450m de comprimento por 4500m de profundidade.

Figura 6.27: Resultado da inversão depois de 8 iterações. Modelo de velocidade niptomográfico obtido pela inversão dos parâmetros dos dados de entrada, resultantes da marcação manual realizada na seção empilhada CRS otimizada do Marmousi e do modelo inicial da Figura 6.26. Comparar com a figura 6.6.

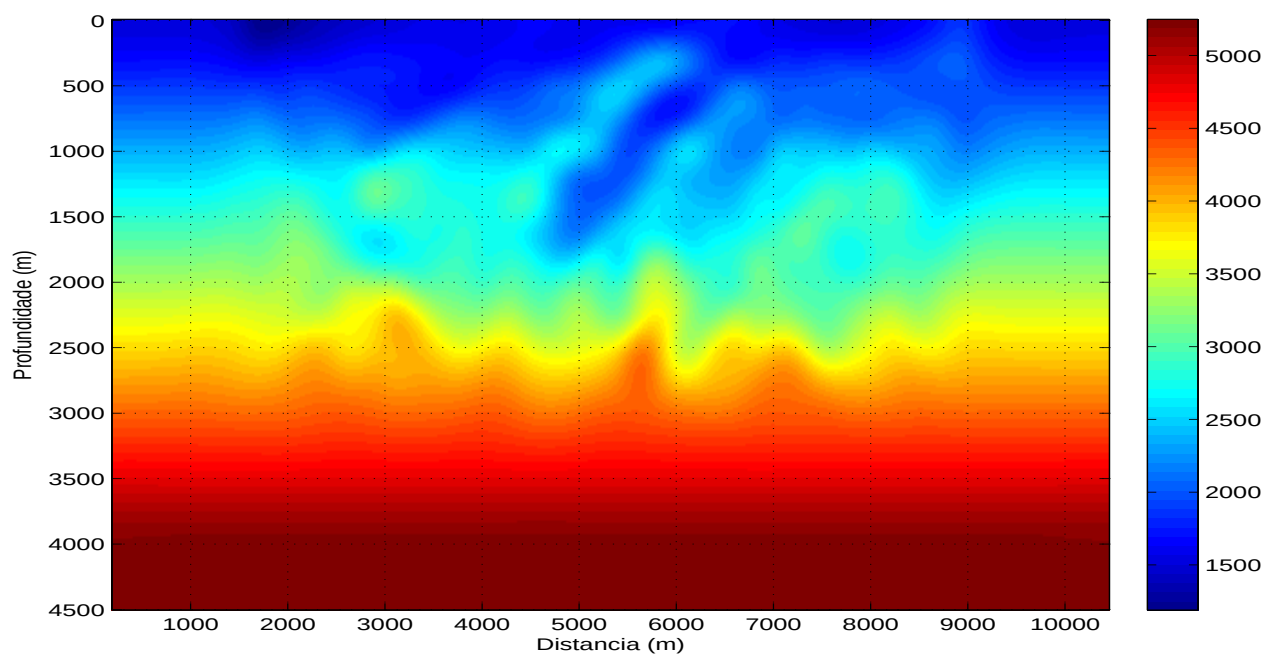


Figura 6.28: Figura 6.27 suavizada à 50 pontos na direção horizontal e 10 pontos na direção vertical.

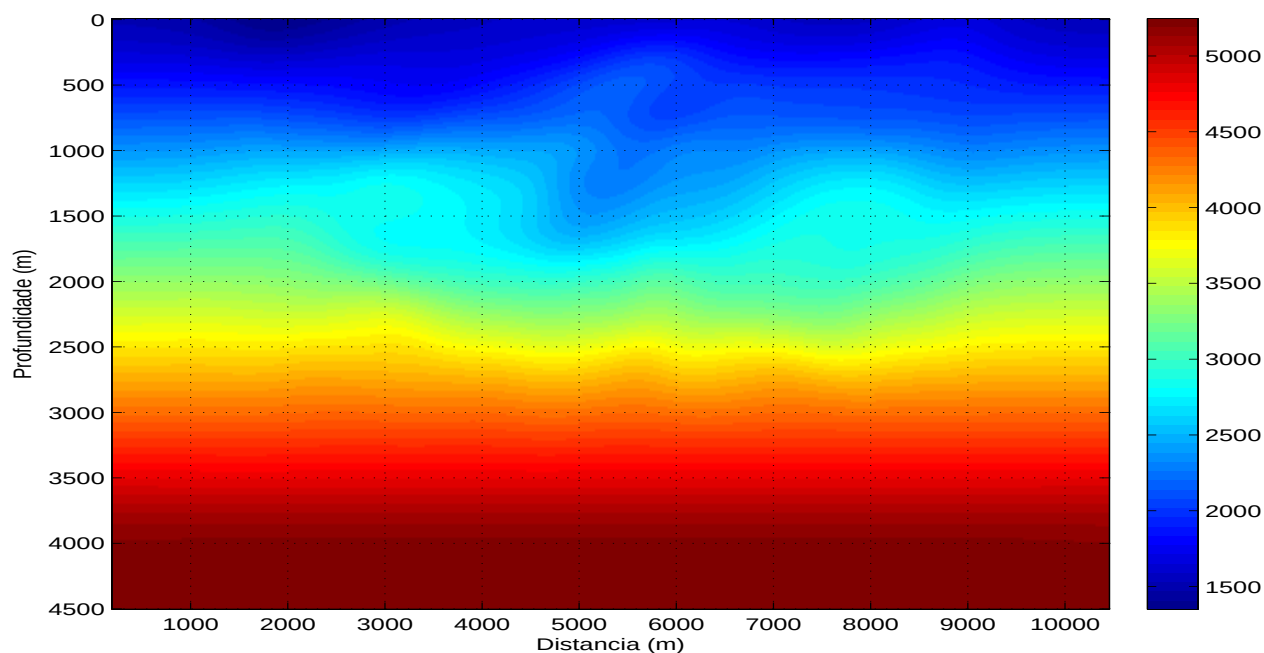


Figura 6.29: Resultado da inversão depois de 8 iterações, onde os pontos em cruz são as 2276 marcações feitas na seção empilhada CRS sobrepostas ao modelo de velocidade em profundidade na figura 6.27.

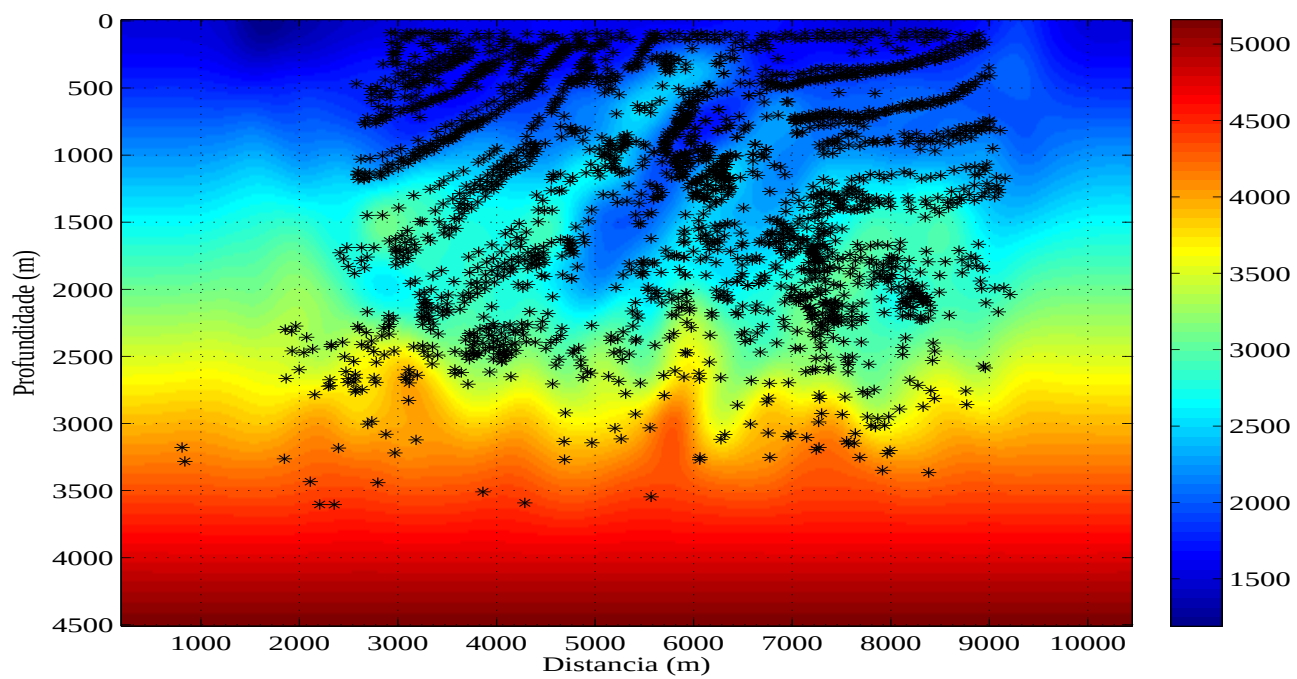


Figura 6.30: Figura 6.29 suavizada à 50 pontos na direção horizontal e 10 pontos na direção vertical.

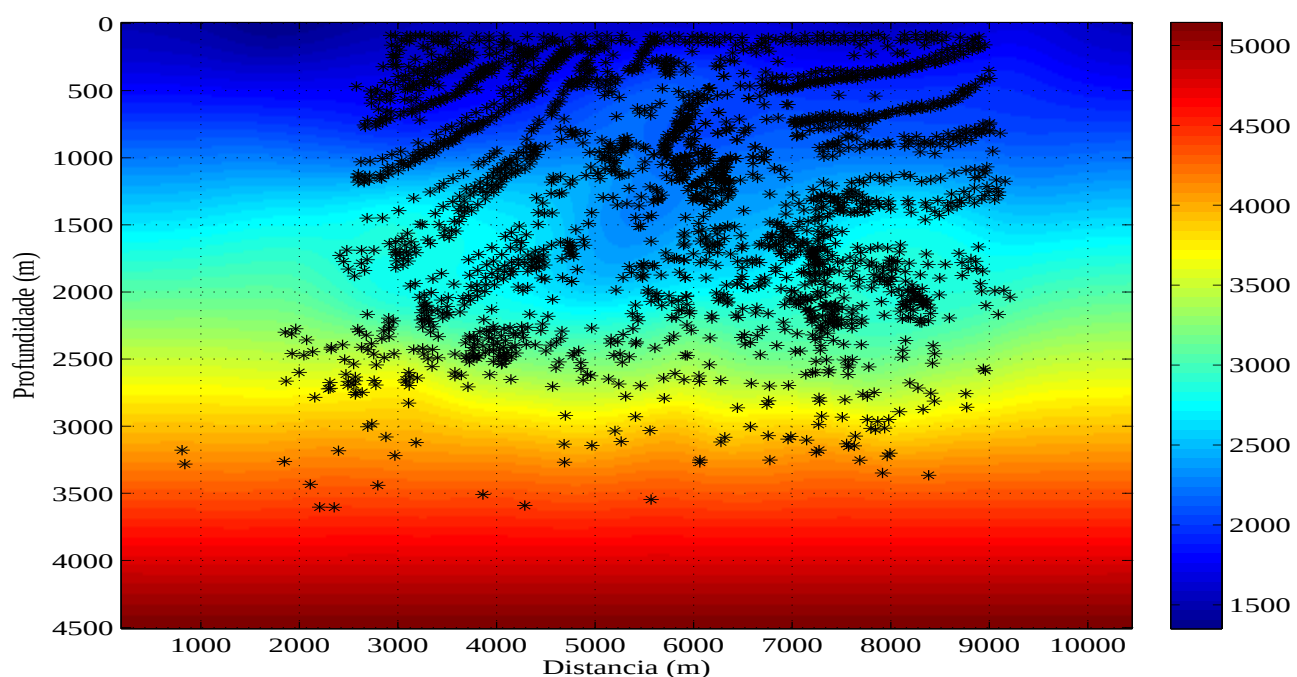


Figura 6.31: Resultado da inversão depois de 8 iterações mostrando o traçamento dos 2276 raios normais correspondendo aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)^{(\text{NIP})}$ final.

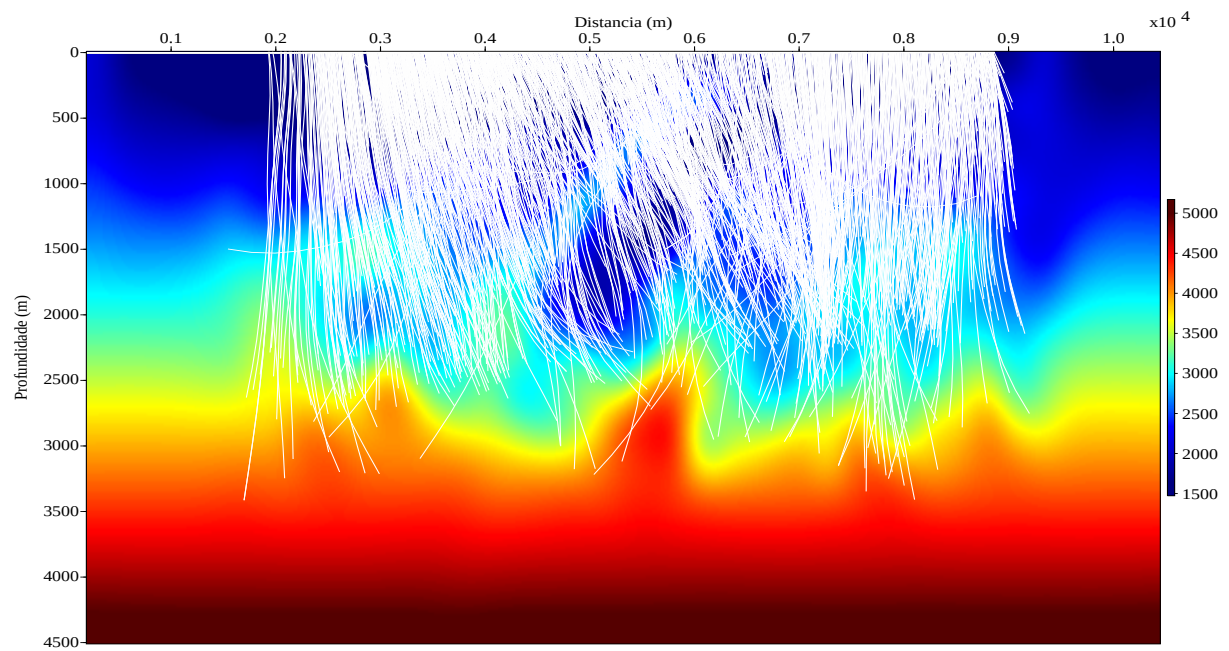
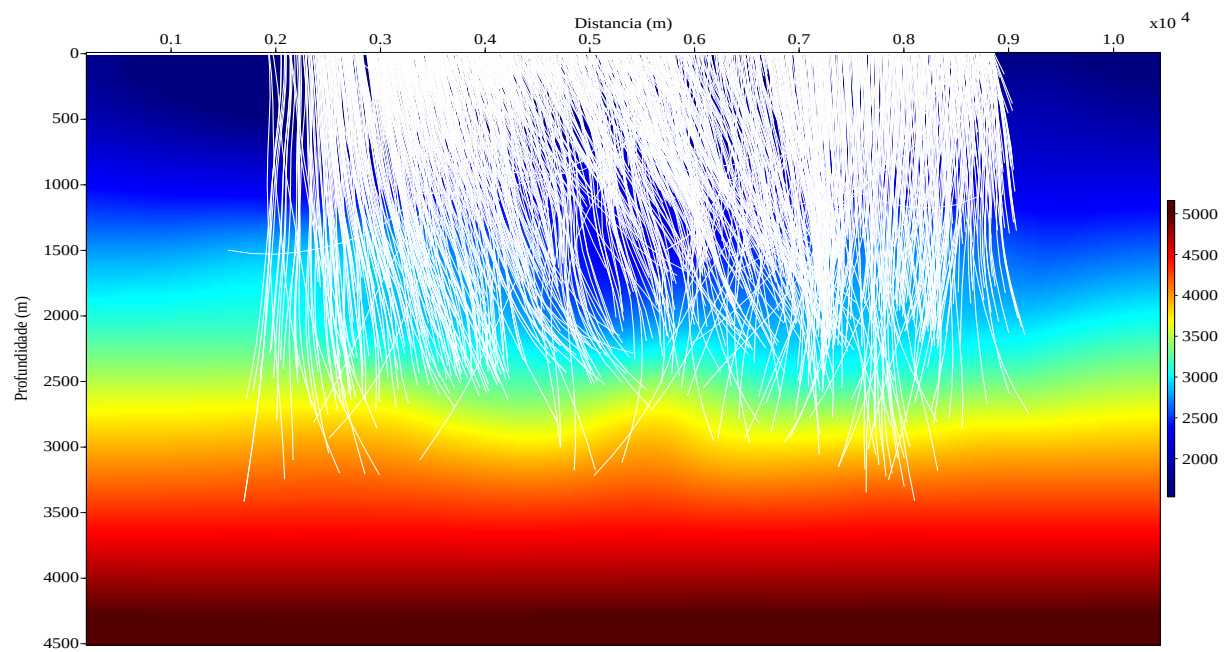


Figura 6.32: Figura 6.31 suavizada à 50 pontos na direção horizontal e 10 pontos na direção vertical.



6.3.2 Modelo Inicial Semblance

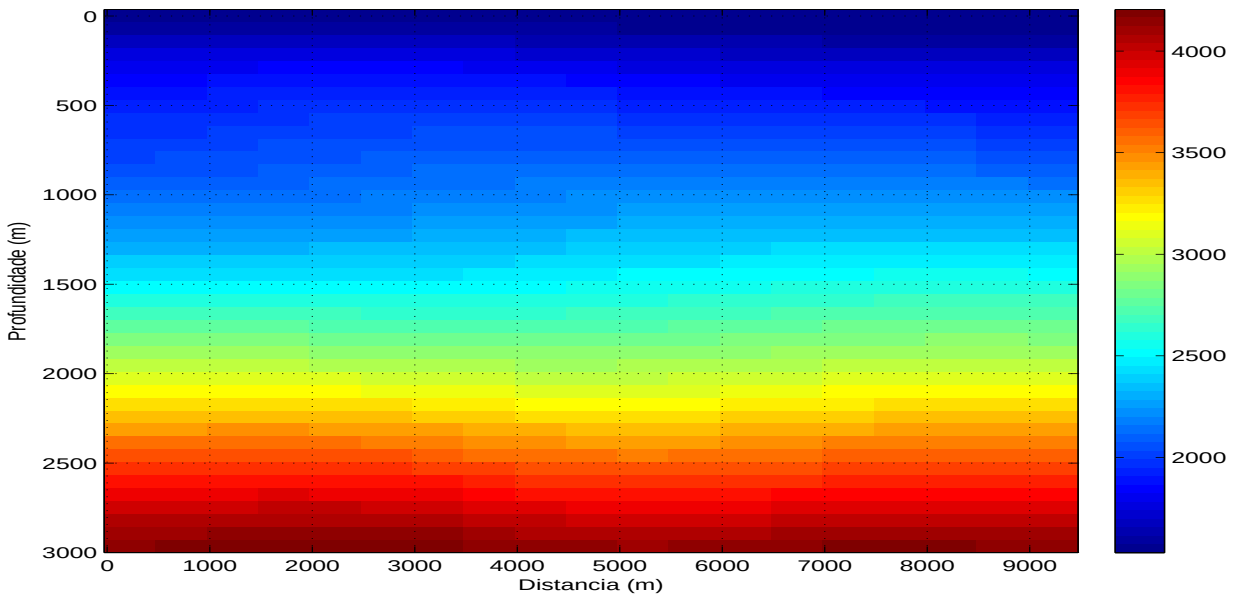
O objetivo desta seção é aplicar o modelo de velocidade semblance (transformado para a profundidade) do Marmousi (Figura 6.8) como modelo de partida da tomografia da onda NIP para se obter a distribuição de velocidades para comparar com o caso do modelo inicial linear da Figura 6.28.

O modelo de velocidade semblance (em profundidade) da Figura 6.8 é dado por uma matriz de ordem (750×574) , e o primeiro passo foi reamostrá-lo para as mesmas dimensões da malha niptomográfica, normalmente calculado com os valores $xknots$ e $zknots$ ($n_x \times n_z = 42 \times 19 = 798$ nós B-spline)². A reamostragem foi feita pela média aritmética:

$$v_S(i, j) = \frac{1}{N \times M} \sum_{n=N}^{n=1} \sum_{m=M}^{m=1} v_E(n, m) \quad (6.2)$$

com a razão igual a $N = 17$ na direção vertical e $M = 30$ na direção horizontal. Dessa forma, a matriz do modelo semblance (Figura 7.7) foi reamostrada para um arquivo com ordem (42×19) , equivalente a 798 valores de velocidade (Figura 6.33), distribuídos ao longo da seção.

Figura 6.33: Mapa de velocidades semblance em profundidade reamostrado utilizado como entrada na niptomografia. A reamostragem foi de (750×574) para (42×19) pontos da malha pelo traçamento de raios. Observar a grande consistência com os modelos das Figuras 6.8 e 6.28, onde a variação dos valores de velocidade pelo paleta e o degradê confirmam a coerência da metodologia.

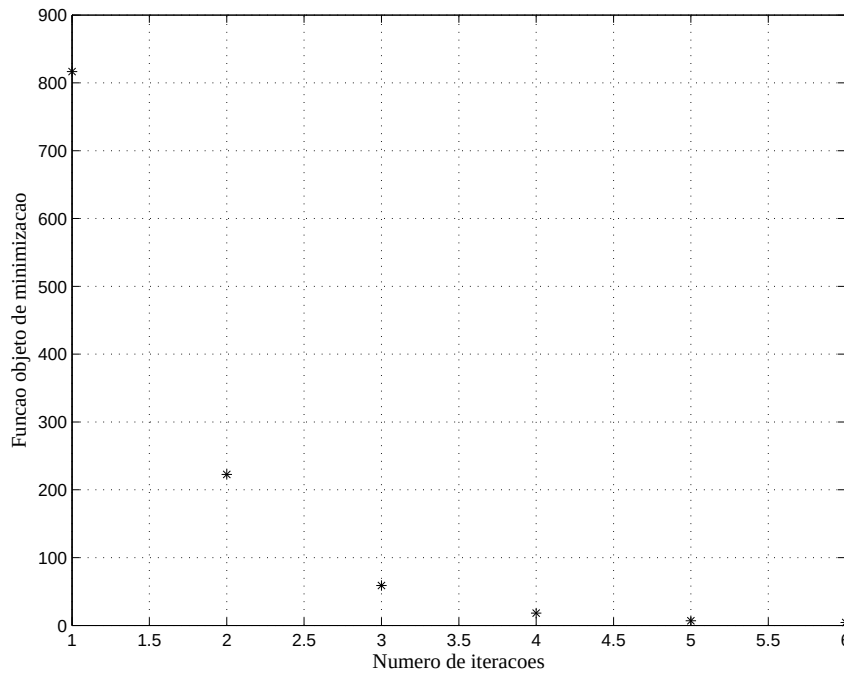


² n_x e n_z representam, respectivamente, o número de colunas e linhas da malha niptomográfica criada.

A malha possui 798 nós B-spline e o arquivo do mapa de velocidade (Figura 6.33) contém 798 valores de velocidade, e para cada nó existe um determinado valor de velocidade. A matriz de ordem (798×3) tem na primeira coluna os valores de n_x , na segunda coluna os valores de n_z e na terceira coluna os valores de velocidade em cada nó da malha.

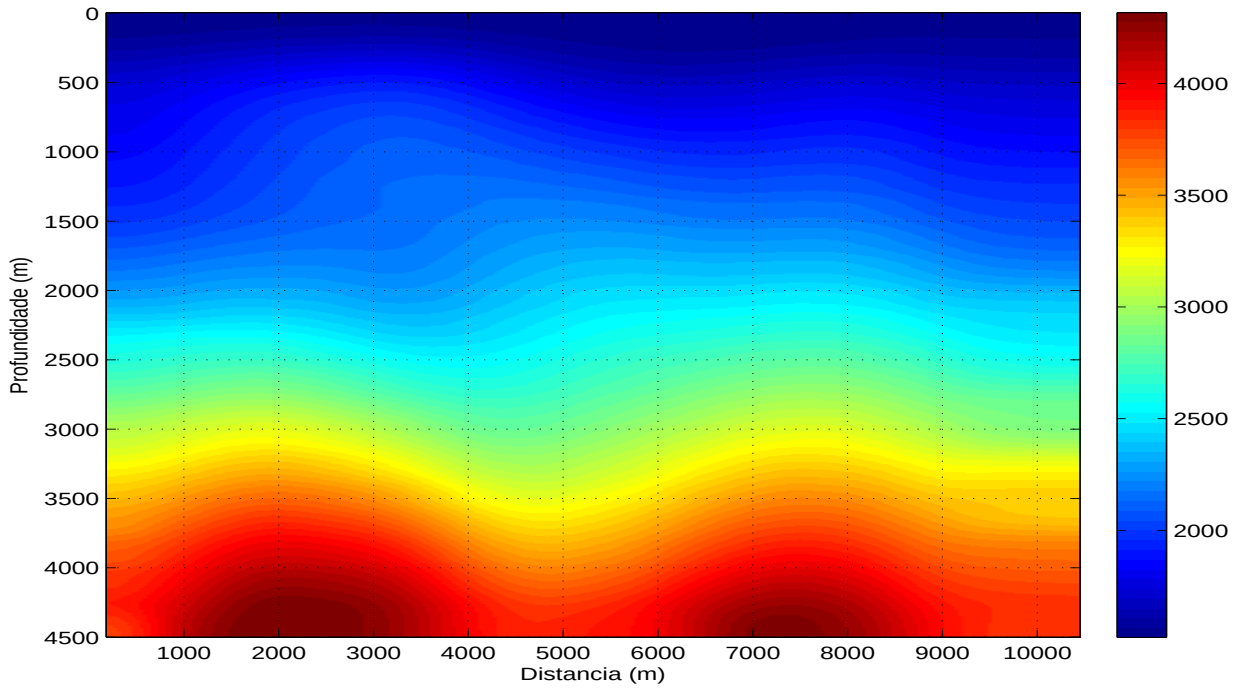
No programa *niptomo* (DUVENECK, 2004), o modelo inicial de velocidade qualquer, obedecendo a estrutura matricial, entra no parâmetro *vinput*, em vez dos parâmetros v_0 e $grad_0$ para o modelo linear. A Figura 6.34 exibe a evolução da função desajuste que apresenta seu menor valor na sexta iteração igual a 4.35471. Ressalta-se o valor relativamente elevado da primeira iteração, igual a 816.714, e que a partir da quinta iteração o valor do desajuste se estabiliza ao redor de 6.8.

Figura 6.34: Função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações da inversão, utilizando o modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) como entrada. Foram executadas 6 iterações inversas não-lineares, onde se observa a grande diferença entre os valores da primeira e da última iteração, respectivamente iguais a 816.714 e 4.3547.



A Figura 6.35 mostra o mapa de distribuição de velocidades niptomográfico, considerada final do Marmousi, plotado com o acréscimo de $1500m$ aplicado em cada extremidade da malha para evitar efeitos de borda, utilizando o modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) como modelo inicial. Se observa os maiores valores na região mais profunda. A comparação com a Figura 6.28 mostra que os modelos são consistentes.

Figura 6.35: Resultado da inversão com 6 iterações da distribuição de velocidade niptomográfica do Marmousi, onde o modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) foi utilizado como modelo inicial. Consistentemente, as maiores velocidades estão nas partes mais profundas. A comparação mostra que o mapa da Figura 6.28 apresenta melhor qualidade visual devido sua maior suavidade e melhor distribuição dos valores de velocidade ao longo da seção.



6.4 MIGRAÇÃO

A Figura 6.36 mostra a seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade usando o modelo de velocidade niptomográfico (Figura 6.28), onde se observa que os eventos estão muito pouco visíveis, já que este modelo de velocidade contém o acréscimo de $1500m$ aplicado em cada extremidade da malha para evitar efeitos de borda e devido a informação no seção empilhada CRS (Figura 6.17) estar compreendida no intervalo entre $1713m$ e $8875m$ na direção horizontal e entre 0 e $3000m$ na direção vertical.

Para se obter uma seção migrada com a maior qualidade de informação da subsuperfície, os modelos de velocidade niptomográfico das Figuras 6.28 e 6.35 foram reajustados para os limites entre $3000m$ e $9200m$ na direção horizontal, e entre 0 e $3000m$ na direção vertical (ver Figuras 6.37 e 6.38).

Nas Figuras 6.39 e 6.40 estão mostrados, respectivamente, os modelos de velocidade de referência e semblance do Marmousi, cujas coordenadas foram ajustadas para os mesmos

limites das coordenadas do modelo da Figura 6.37, objetivando aplicá-los no empilhamento CRS (Figura 6.17) para se obter seções migradas na profundidade que sirvam de referência às respectivas seções obtidas a partir dos modelos de velocidades niptomográfico (Figuras 6.37 e 6.38).

Utilizando a seção empilhada CRS otimizada, as Figuras 6.41, 6.42, 6.43 e 6.44 mostram as migrações Kirchhoff na profundidade obtidas a partir dos modelos de velocidade niptomográfico (Figura 6.37), niptomográfico usando o modelo semblance reamostrado como entrada (Figura 6.38), de referência (Figura 6.39) e semblance (Figura 6.40), onde se observa uma consistência nas respectivas seções em relação à da Figura 6.36, devido a boa continuidade e horizontalização dos eventos refletores em toda seção, à correção das falhas geológicas, ao colapso das difrações, à recuperação de eventos na região central e à inexistência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). Nas seções migradas das Figuras 6.42 e 6.44 se observam muitas regiões de baixa frequência ao longo dos refletores, demonstrando que a utilização dos respectivos modelos de velocidade (Figuras 6.38 e 6.40) fornecem seções com muitas limitações. A grande coerência entre as seções migradas Kirchhoff das Figuras 6.41 e 6.43 evidencia a coerência da metodologia de inversão na obtenção do modelo de velocidade niptomográfico mais próximo das estruturas geológicas. O valor utilizado para o parâmetro de abertura lateral em todas as migrações foi de $300m$.

Comparando estas seções migradas com as migrações das Figuras 6.11, 6.12, 6.18 e 6.19, qualitativamente, e com as das Figuras 6.14 e 6.15, quantitativamente, vemos que as Figuras 6.41 e 6.43 são bem mais consistentes e visíveis para interpretação das estruturas geológicas, além do que aparecem evidências de eventos contínuos na região central, inexistentes nas seções obtidas com os métodos de empilhamento NMO e CRS, demonstrando a evolução dos resultados tanto em relação aos modelos de velocidade quanto do imageamento das estruturas geológicas.

Figura 6.36: Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades niptomográfico suavizado da Figura 6.28 que contém o acréscimo de 1500m aplicado em cada extremidade da malha para evitar efeitos de borda, limitando consideravelmente a análise das estruturas geológicas da seção.

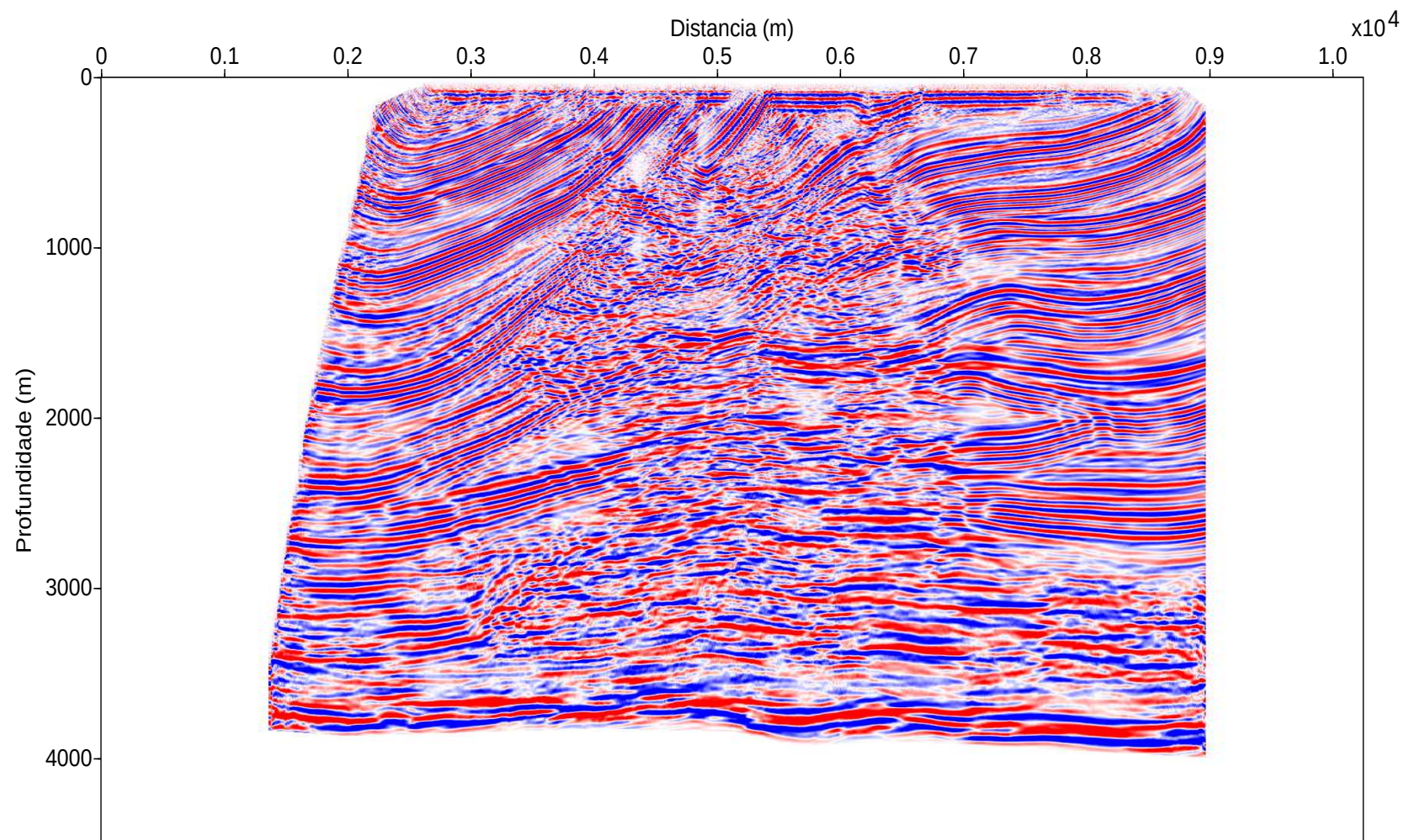


Figura 6.37: Modelo de velocidade niptomográfico suavizado do Marmousi (Figura 6.28), utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre 3000m e 9200m de distância e entre 0 e 3000m de profundidade.

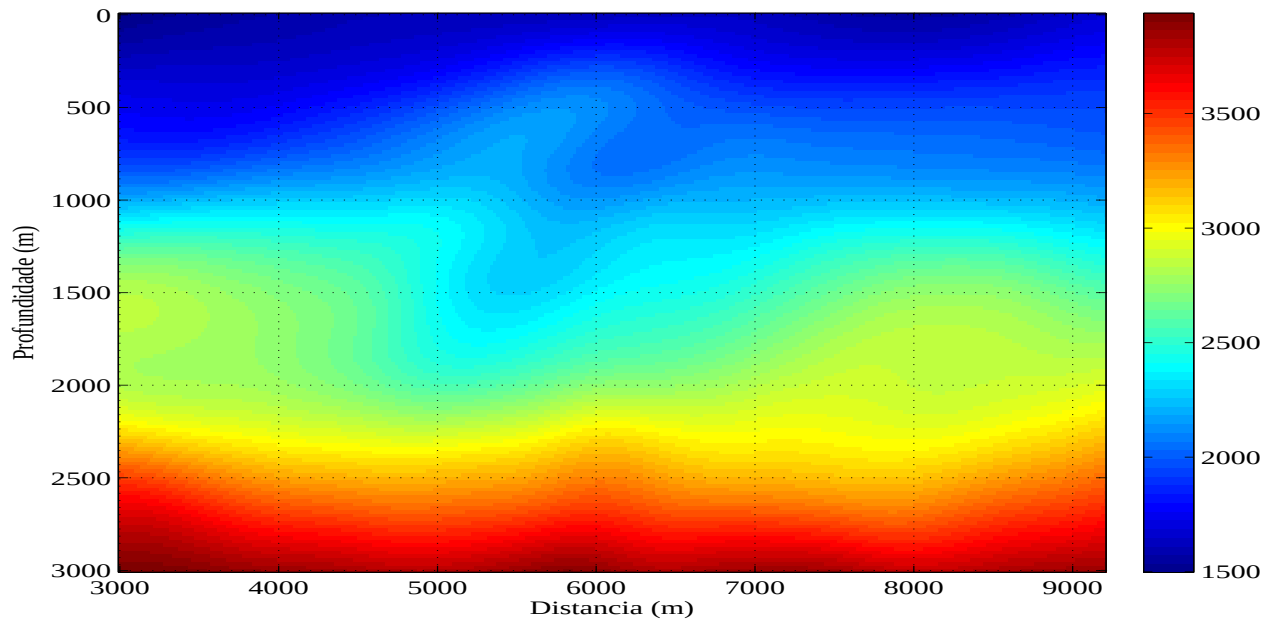


Figura 6.38: Modelo de velocidade niptomográfico suavizado do Marmousi (Figura 6.35), obtido a partir da aplicação do modelo semblance reamostrado (Figura 6.33) como vínculo adicional de entrada, utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre 3000m e 9200m de distância e entre 0 e 3000m de profundidade.

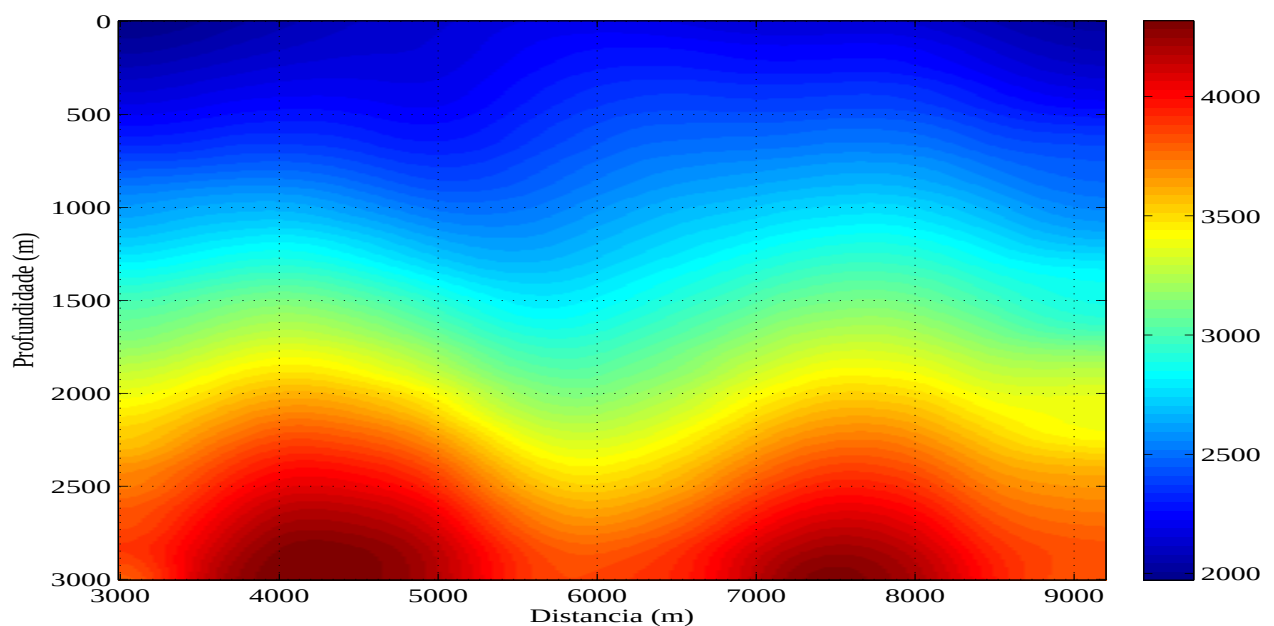


Figura 6.39: Modelo de velocidade de referência suavizado do Marmousi, obtido a partir da Figura 6.5, utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre 3000m e 9200m de distância e entre 0 e 3000m de profundidade.

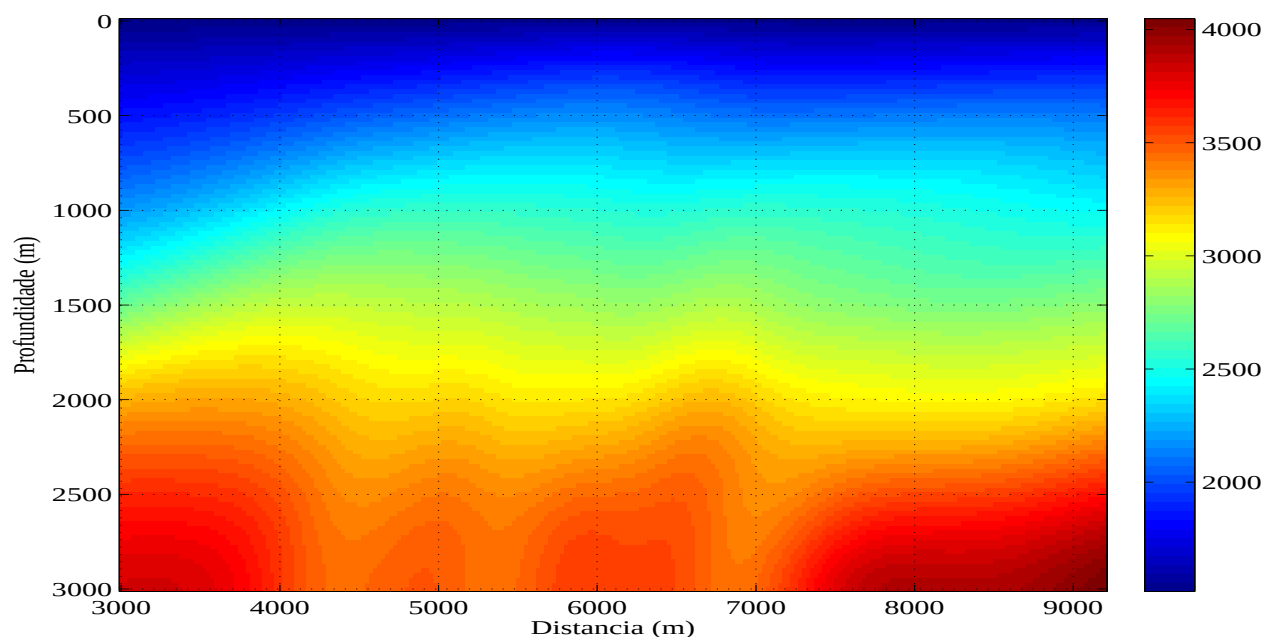


Figura 6.40: Modelo de velocidade semblance suavizado do Marmousi em profundidade (Figura 6.8), utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para valores entre 3000m e 9200m de distância e entre 0 e 3000m de profundidade.

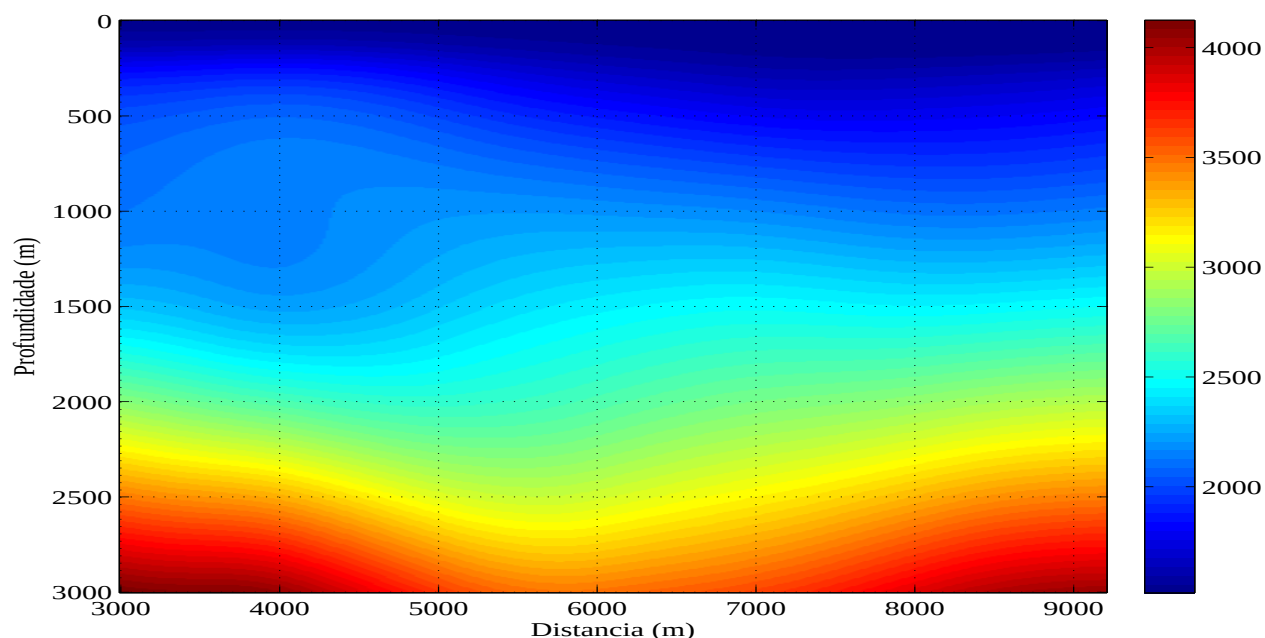


Figura 6.41: Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades niptomográfico suavizado da Figura 6.37, onde se observa com melhor resolução a boa continuidade e horizontalização dos eventos refletor, a correção das falhas geológicas, o colapso das difrações, a recuperação de eventos na região central e a inexistência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”).

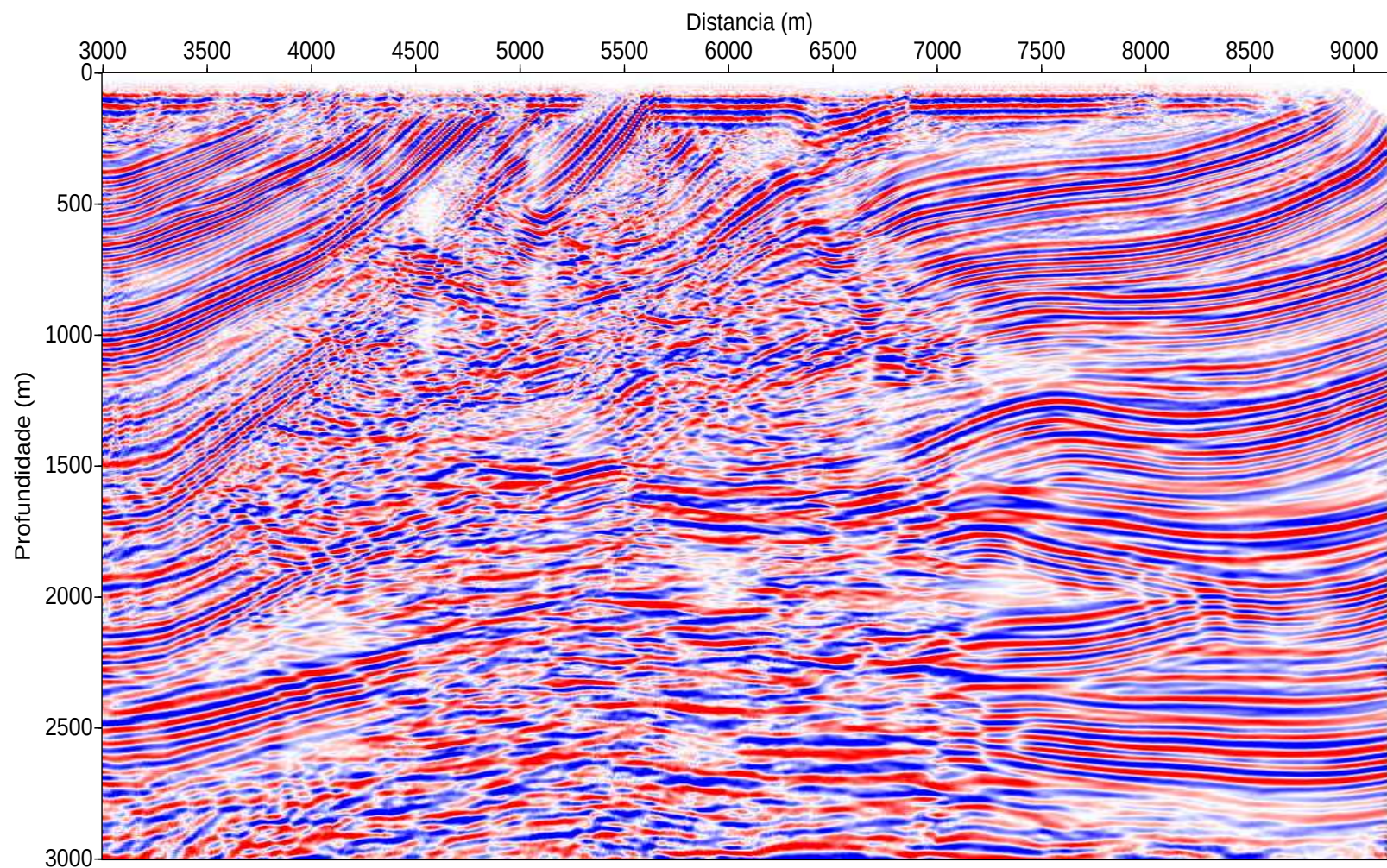


Figura 6.42: Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades niptomográfico da Figura 6.38, onde se observa a baixa qualidade visual da seção devido muitas regiões de baixa frequência, demonstrando que este modelo de velocidade, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 6.37, possui grandes limitações.

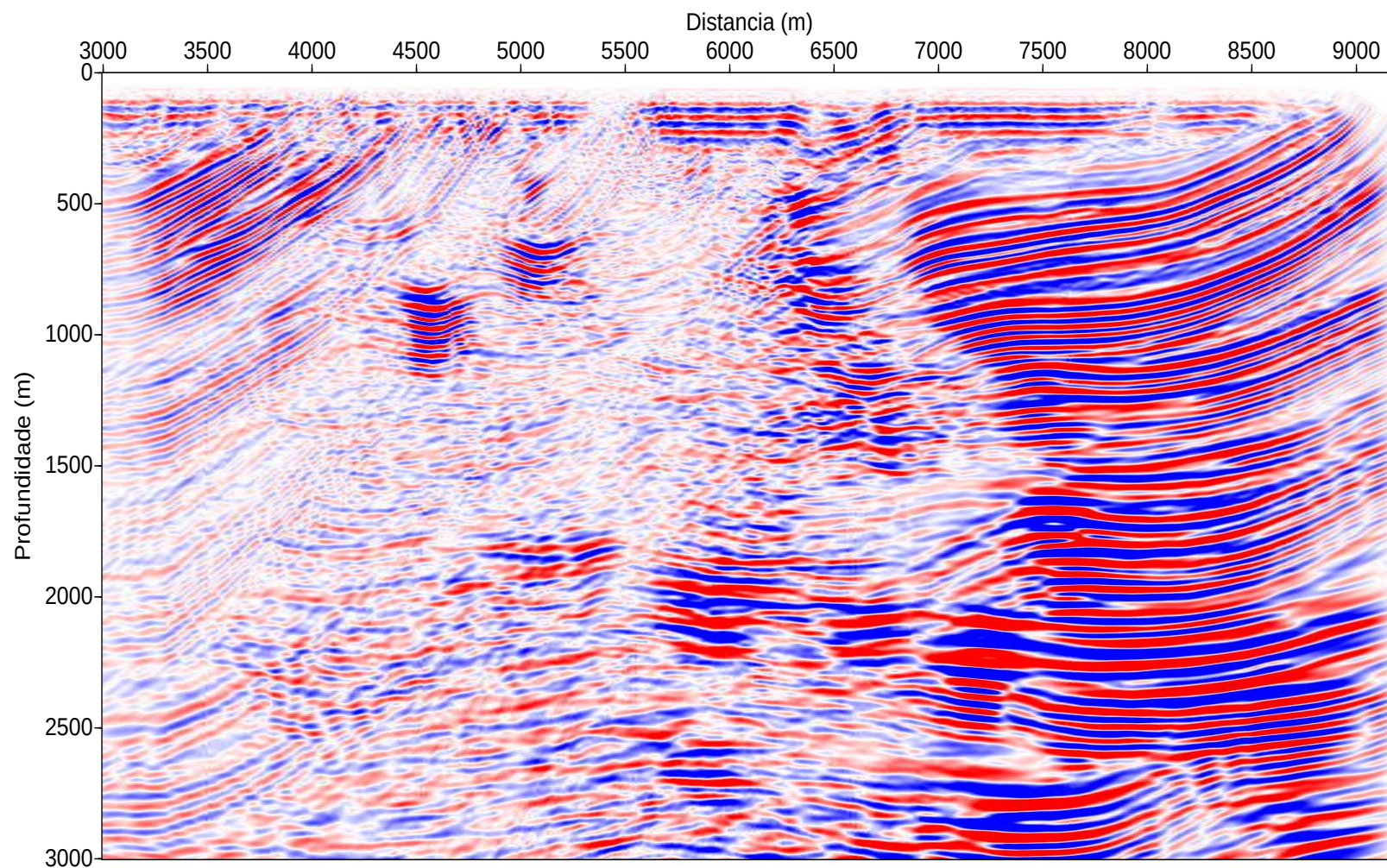


Figura 6.43: Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o mapa de velocidades de referência suavizado da Figura 6.39, onde se observa a boa consistência com a seção migrada da Figura 6.41, evidenciando a coerência da metodologia de inversão utilizada.

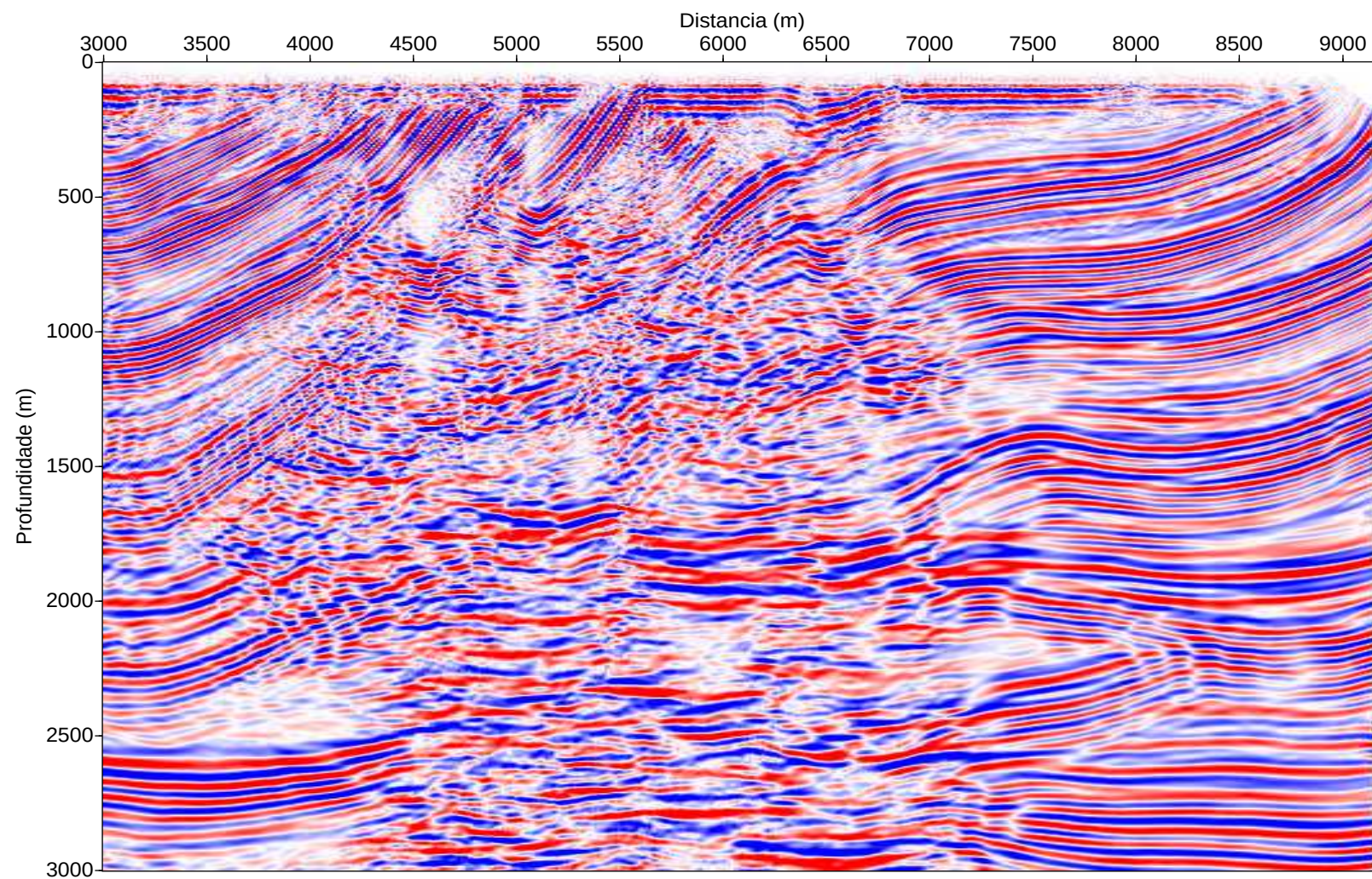
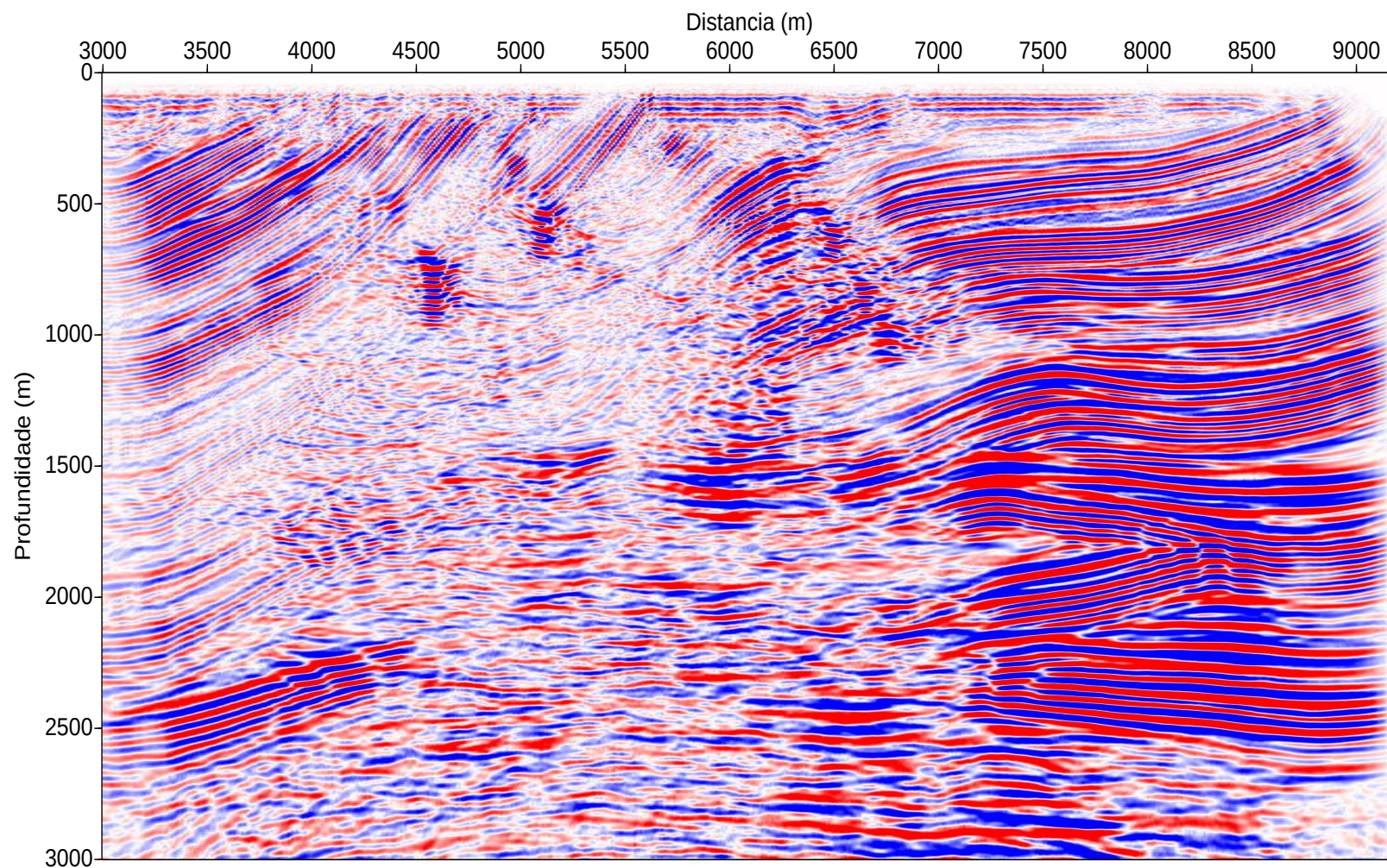


Figura 6.44: Migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.17) utilizando o modelo de velocidade semblance suavizado em profundidade (Figura 6.8), onde se observa a baixa qualidade visual da seção devido muitas regiões de baixa frequência, demonstrando que este modelo de velocidade, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 6.37, possui uma considerável limitação.



7 BACIA DO JEQUITINHONHA

O segundo dado do presente trabalho é da bacia geológica do Jequitinhonha, linha L2140266. São apresentados seus aspectos geológicos e da aquisição, além de apresentados os resultados do processamento e imageamento sísmico 2D obtidos através da aplicação do métodos de empilhamento NMO e CRS, e de inversão niptomográfica.

7.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS E AQUISIÇÃO

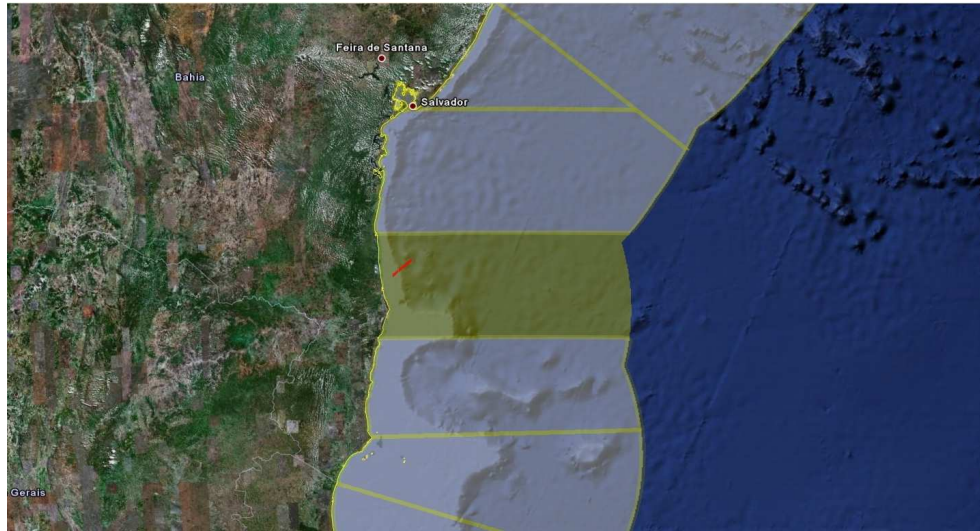
A Bacia do Jequitinhonha pertence ao grupo de bacias litorâneas brasileiras e localiza-se na margem leste da costa brasileira, no litoral do estado da Bahia, entre os paralelos de $14^{\circ}37'$ sul e $16^{\circ}24'$ sul (Figura 7.1). Possui cerca de 5535 km^2 de área submersa (aproximadamente 20 % da área total), 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 $3000m$ de profundidade. Ao sul, tem-se uma plataforma mais alongada que pode chegar a $85km$ de extensão, e um talude mais íngreme, cuja profundidade varia de $50m$ a $3000m$.

Figura 7.1: Mapa de localização da bacia do Jequitinhonha com ênfase na área de estudo (em amarelo), onde o fundo do mar varia de $50m$ à $3000m$ de profundidade.



Fonte: <http://www.anp.gov.br/>.

Figura 7.3: Mapa de localização da linha sísmica utilizada (em vermelho) da bacia do Jequitinhonha.



Fonte: <http://www.anp.gov.br/>.

Os parâmetros da aquisição são descritos na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Parâmetros da aquisição do conjunto de dados pré-empilhado da bacia do Jequitinhonha.

Geometria de tiros e receptores	
Número de tiros	1578
Intervalo de tiros	25m
Número de receptores	120
Intervalo entre receptores	25m
Estações de tiros	3150m à 42575m
Estações de receptores	25m à 42425m

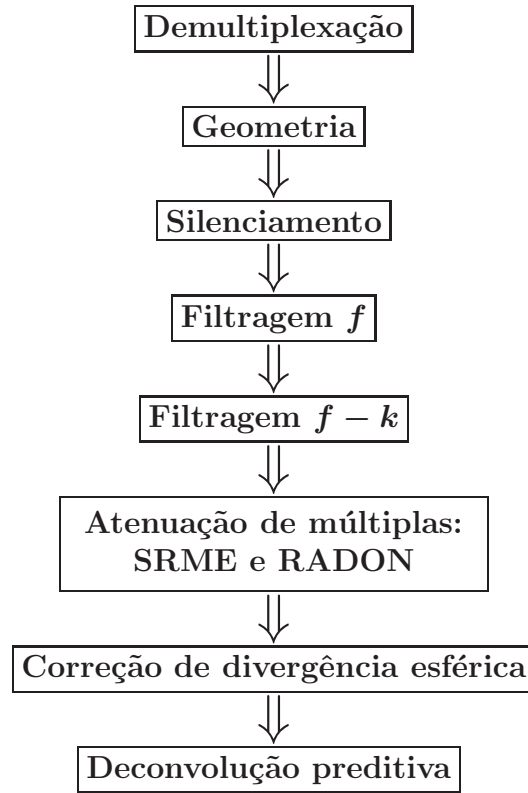
Geometria CMP	
Número de CMP	3274
Intervalo entre CMP	12.5m
Máxima cobertura	60
Distância horizontal da malha	42575m
Distância vertical da malha	7000m

Parâmetros de gravação	
Tempo de gravação	7s
Intervalo de amostragem	4ms
Número de amostras por traço sísmico	1750

Pré-Processamento Sísmico

O fluxograma ilustrando as etapas do pré-processamento aplicadas à linha L2140266 da bacia do Jequitinhonha foi realizado por Lima (2010) e é apresentado na Figura 7.4.

Figura 7.4: Fluxograma do pré-processamento da linha L2140266 por meio do método convencional.



O pré-processamento consta da aplicação de técnicas fundamentais que conduzem a análise de velocidade, a correção NMO, ao empilhamento e a migração. As seções empilhadas e migradas apresentadas neste capítulo estão com ganho *agc* (*automatic gain control*), com uma janela de 0.5s, aplicados para melhorar a visualização dos resultados (revelar eventos com baixa amplitude).

7.2 PROCESSAMENTO SÍSMICO

7.2.1 Empilhamento NMO

A metodologia do processamento é realizada de acordo com uma rotina composta por uma sequência básica, mostrada no fluxograma da Figura 3.1.

O modelo de velocidade suavizado é mostrado na Figura 7.5, e foi obtido através de marcações manuais no mapa semblance em intervalos sucessivos de 50 CDPs, onde cada CDP teve seu número de pontos marcados interpolado para o mesmo número de amostras. O modelo de velocidade representado por mapas de contorno é apresentado na Figura 7.6,

onde se observa os diferentes contrastes de variação de velocidade e a distribuição dos maiores valores de velocidade nas regiões mais profundas da seção.

O mapa de distribuição de velocidades em profundidade da Figura 7.7 (comparar com a Figura 7.25) foi obtido através da Figura 7.5 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$, onde se observa que as regiões de maior velocidade continuam a se distribuir nas regiões mais profundas da seção. O modelo representado por mapas de contorno, onde se observa os diferentes contrastes de variação vertical-horizontal de velocidade, é mostrado na Figura 7.8.

Os modelos de velocidade, nos domínios do tempo e da profundidade, obtidos para a linha L2140266 do Jequitinhonha, foram comparados entre si e todos foram aplicados nas seções sísmicas para se obter os empilhamentos e migrações nos respectivos domínios.

A partir da aplicação do modelo da Figura 7.5 se obteve as seções empilhada (Figura 7.9) e migrada (Figura 7.10) no domínio do tempo (comparar com a seção migrada 7.15), onde ficam evidentes a boa consistência com as descrições das estruturas geológicas, uma vez que as seções mostram refletores bem contínuos, com poucos artefatos, com as difrações colapsadas, e sem submigração (caso de velocidade de migração subdimensionada), nem sobremigração (caso de velocidade de migração subdimensionada). O empilhamento NMO foi remapeado para profundidade (Figura 7.11), utilizando o modelo de velocidade em profundidade (Figura 7.7), através de uma interpolação linear e de uma extrapolação constante nos pontos marcados no mapa semblance para determinar as velocidades $v_{\text{INT}}(z)$ em intervalos temporais não-especificados.

A migração Kirchhoff na profundidade (Figura 7.12) foi realizada usando o mapa de distribuição de velocidades da Figura 7.7, onde se observa que há significativa recuperação dos eventos refletores, principalmente em grandes profundidades, aumentando a qualidade da seção e tornando-a com eventos mais aparentes (comparar com a seção migrada 7.36). Essa migração mostra seções com aparência melhor do que as migrações no tempo; isto é medido pela continuidade dos refletores. As melhoras foram alcançadas pelo controle das aberturas dos operadores de migração.

Os mapas de velocidade foram plotados no software computacional MATLAB e para realizar os empilhamentos e as migrações se fez uso do sistema CWP/SU através dos seguintes programas, e suas respectivas funções, mostrados na tabela 6.2.

Figura 7.5: Mapa de distribuição de velocidades suavizado em tempo da linha L2140266 do Jequitinhonha, obtido a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde cada CDP teve seu número de pontos marcados interpolado para o mesmo número de amostras.

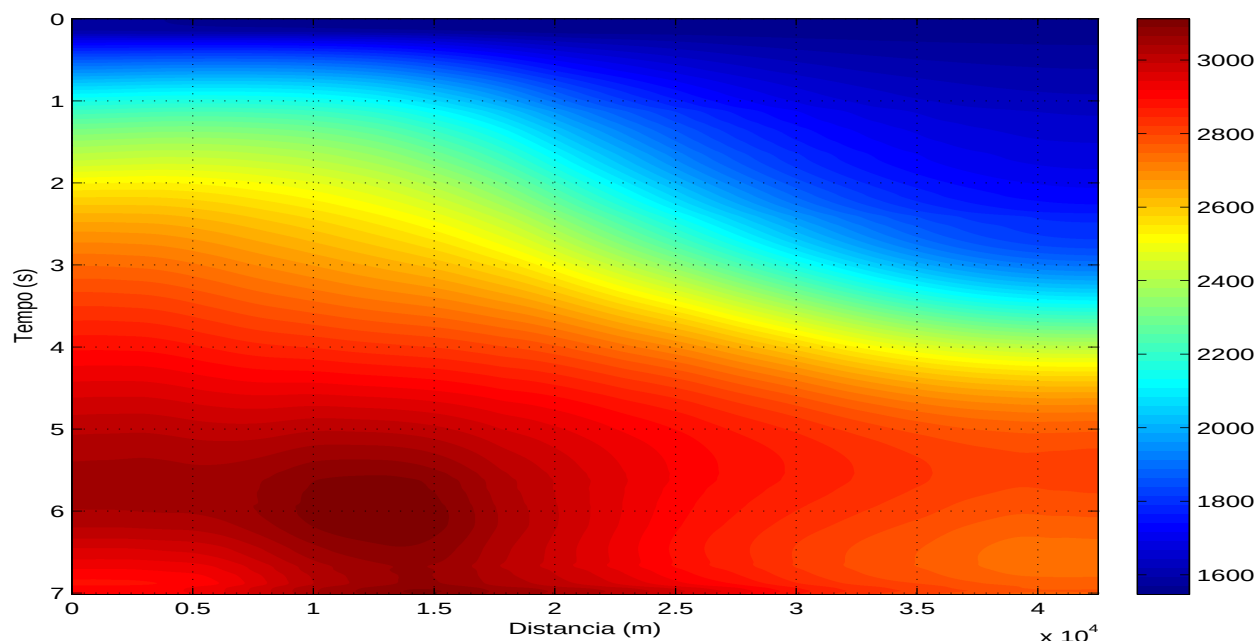


Figura 7.6: Figura 7.5 representada por mapas de contorno para efeito de melhor visualização dos diferentes contrastes de velocidade.

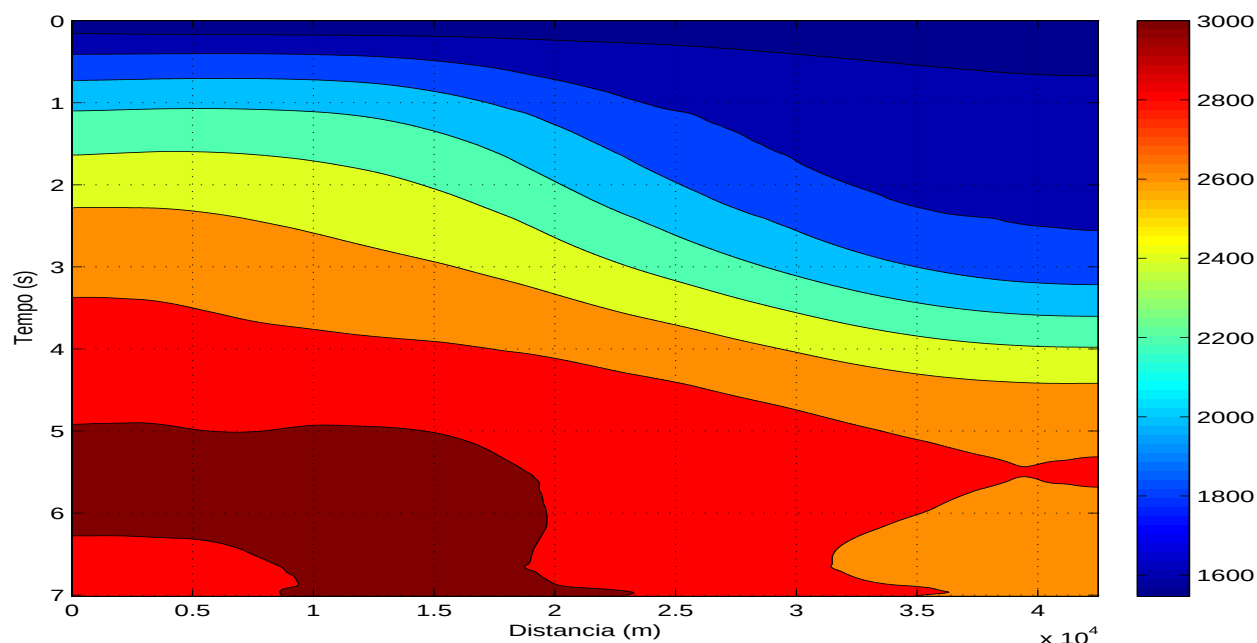


Figura 7.7: Mapa de distribuição de velocidades suavizado em profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, obtido a partir da Figura 7.5 pela conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$.

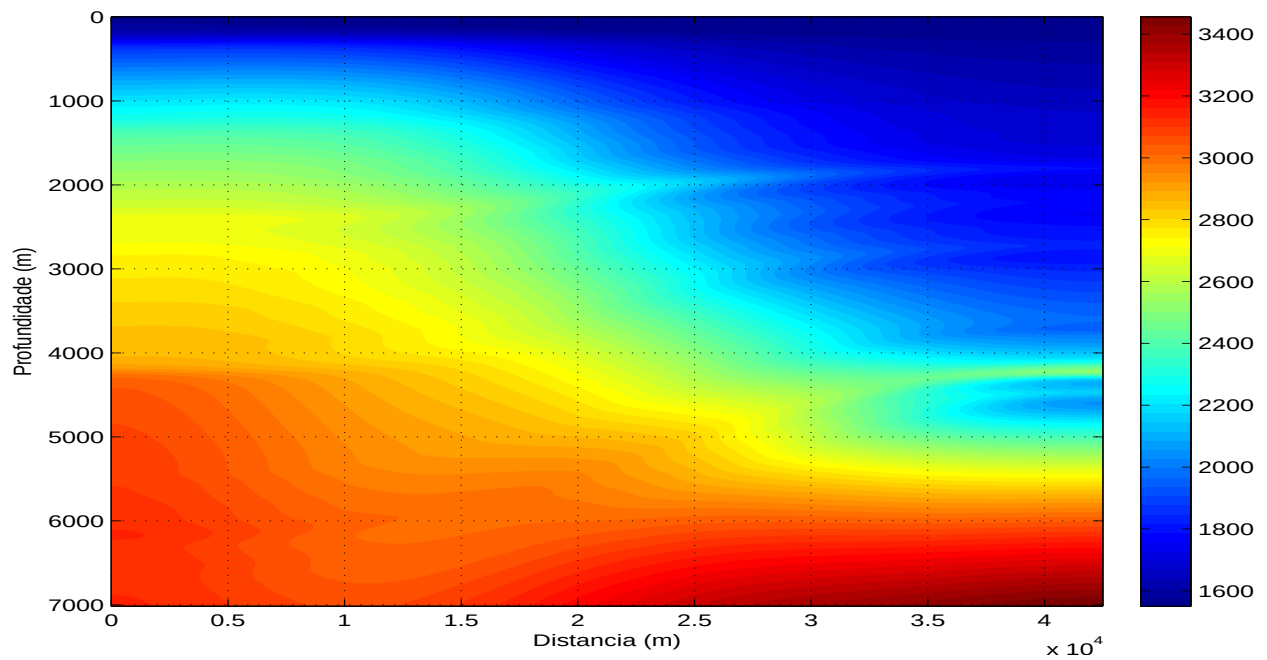


Figura 7.8: Figura 7.7 representada por mapas de contorno para efeito de melhor visualização dos diferentes contrastes de velocidade.

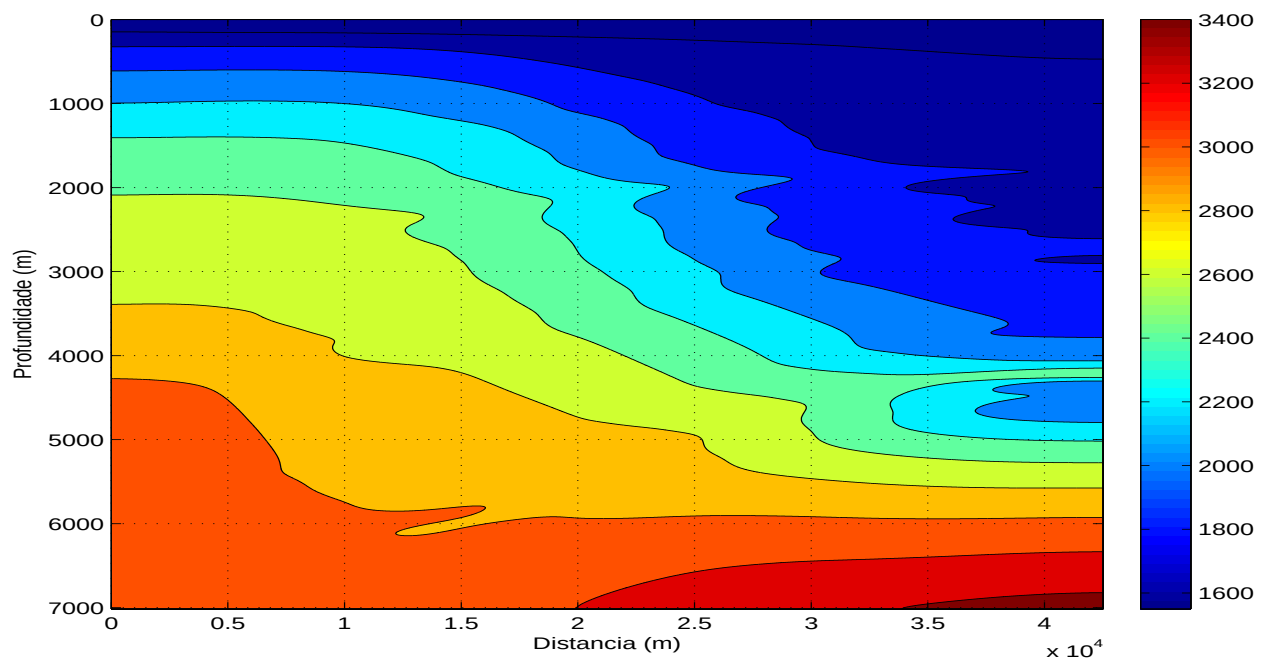


Figura 7.9: Seção empilhada NMO no tempo da linha L2140266 do Jequitinhonha, realizada a partir de marcações manuais no mapa semblance, onde se observa que a maior parte da informação registrada corresponde a eventos rasos, os eventos refletos possuem boa continuidade. No entanto se observam muitas difrações a medida que a profundidade aumenta.

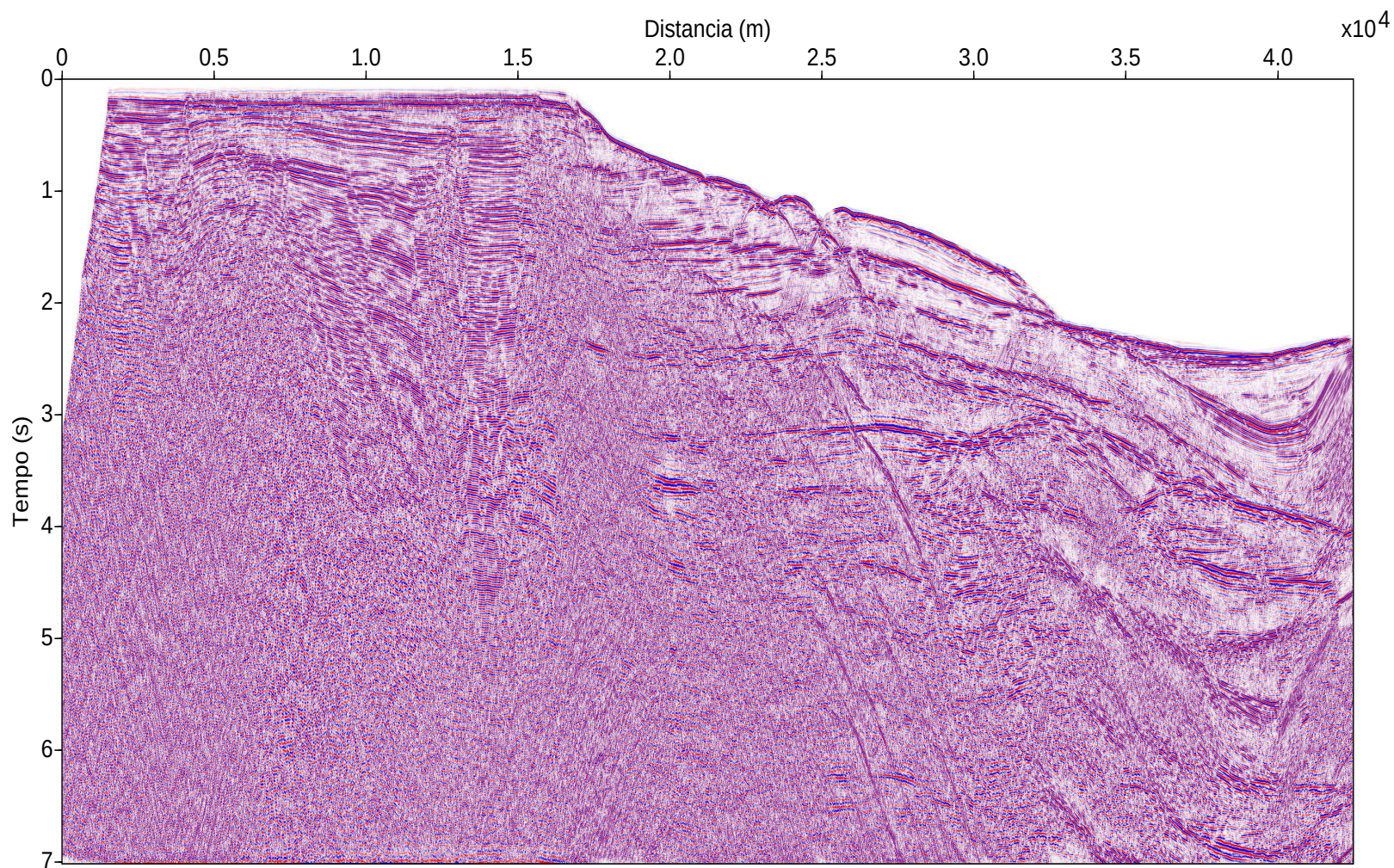


Figura 7.10: Seção migrada Kirchhoff no tempo da linha L2140266 do Jequitinhonha sobre a seção empilhada NMO da Figura 7.9, utilizando o modelo de velocidade da Figura 7.5, onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas e a recuperação de vários eventos refletores em grandes profundidades. Contudo, se observam arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”) nas regiões mais profundas da seção.

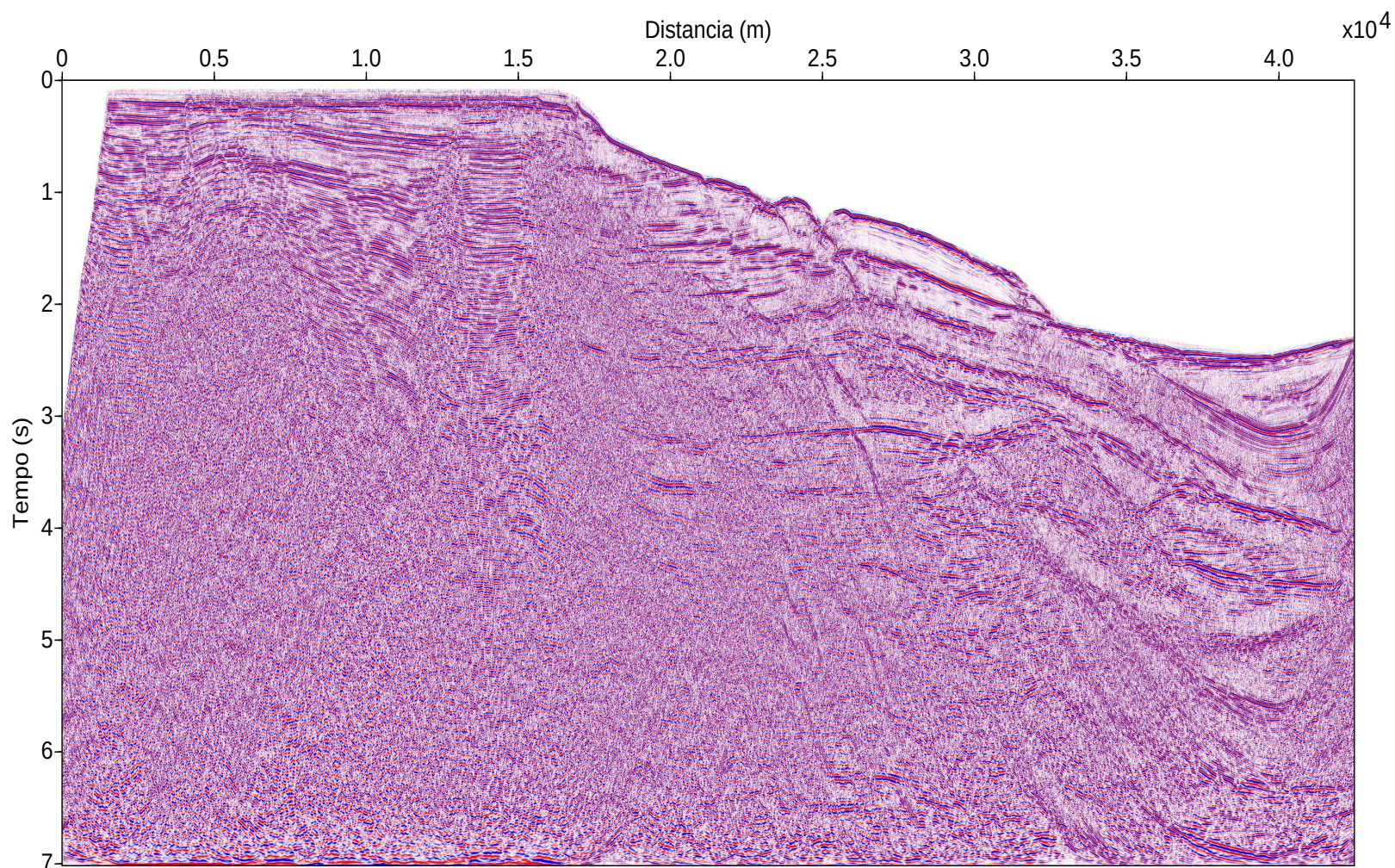


Figura 7.11: Seção empilhada NMO (Figura 7.9) da linha L2140266 do Jequitinhonha remapeada para profundidade, utilizando o modelo de velocidade da Figura 7.7, através de uma interpolação linear e de uma extrapolação constante nos pontos marcados no mapa semblance para determinar as velocidades $v_{\text{INT}}(z)$ em intervalos temporais não especificados. Observar que a seção foi remapeada somente até a profundidade de 5250m.

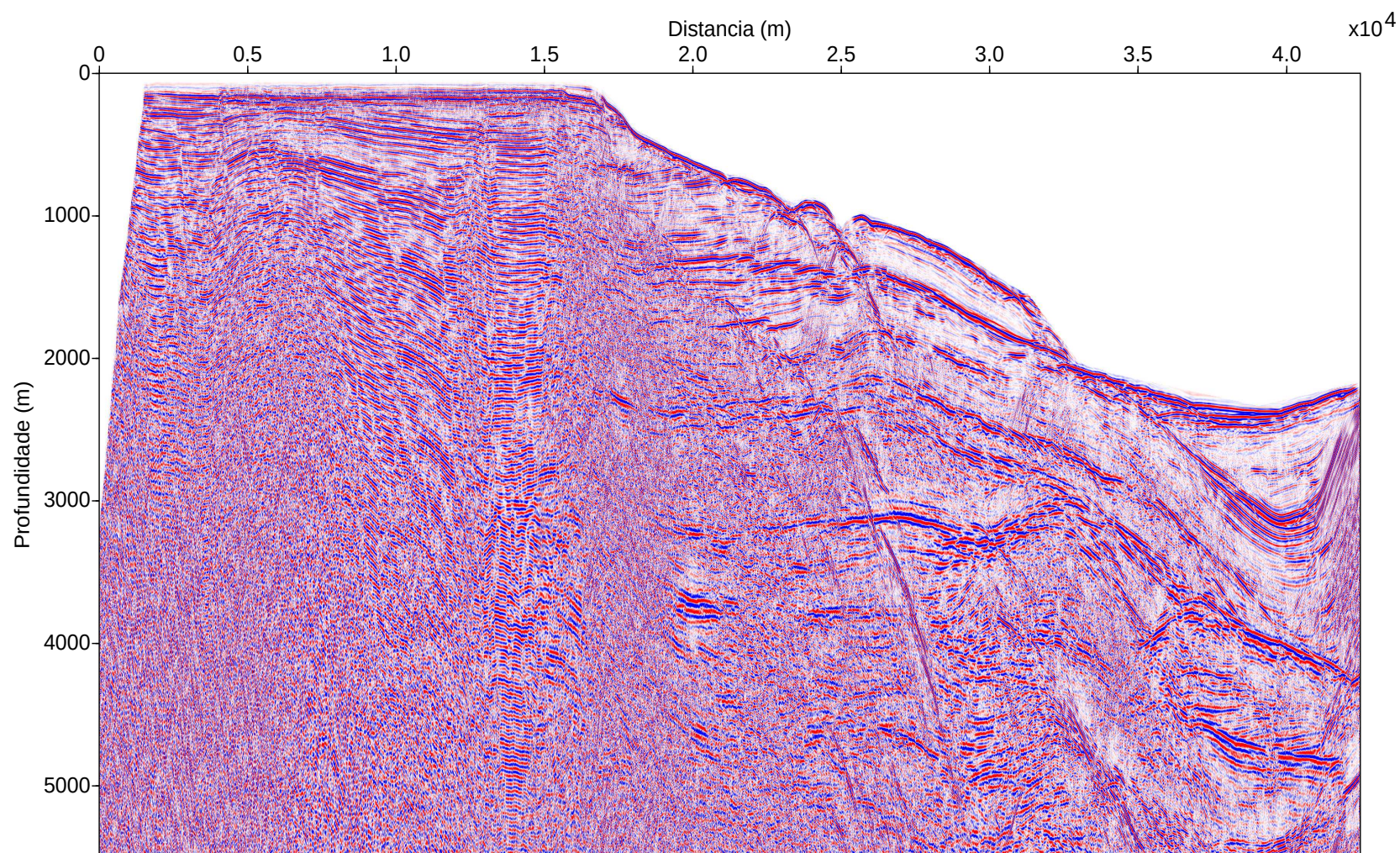
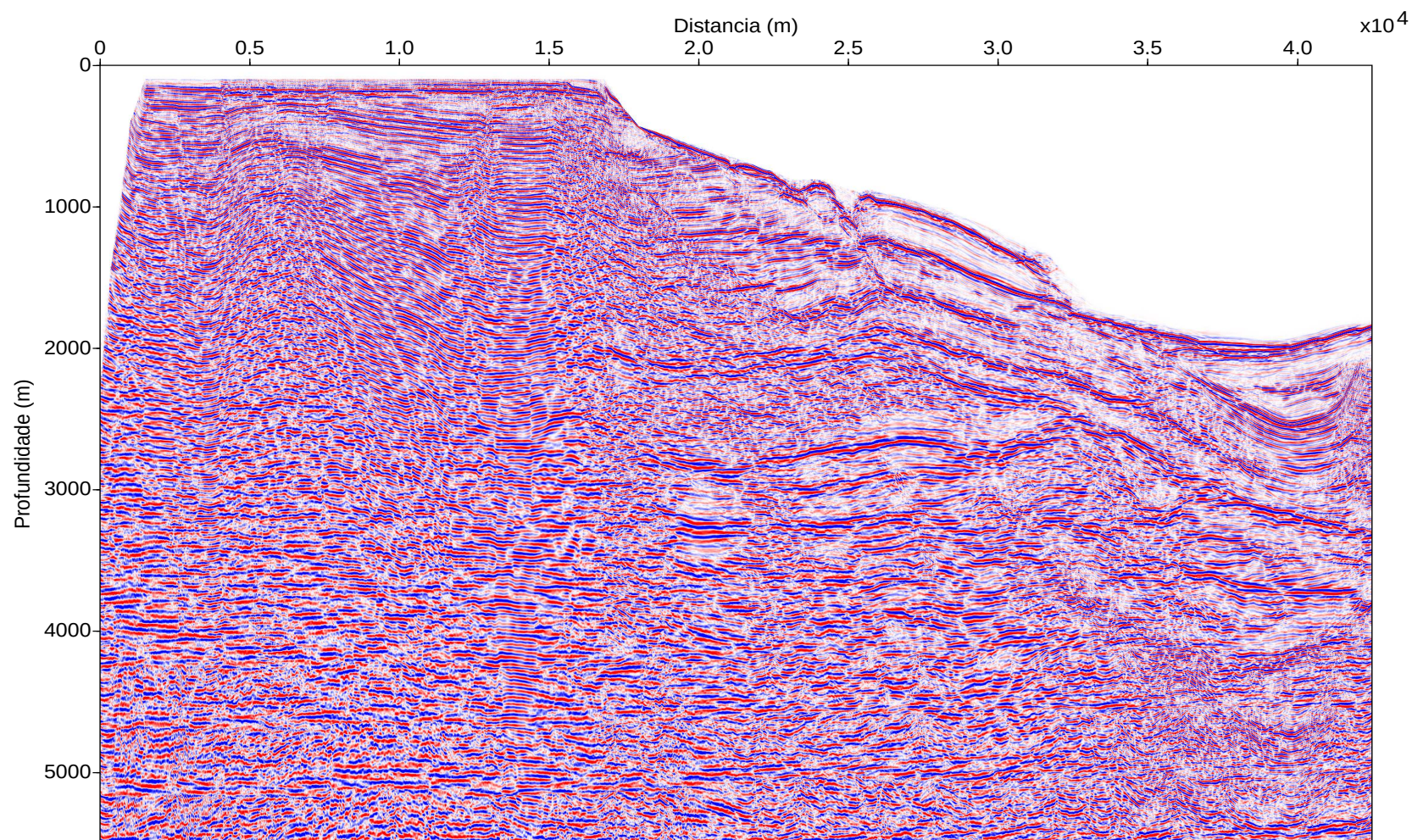


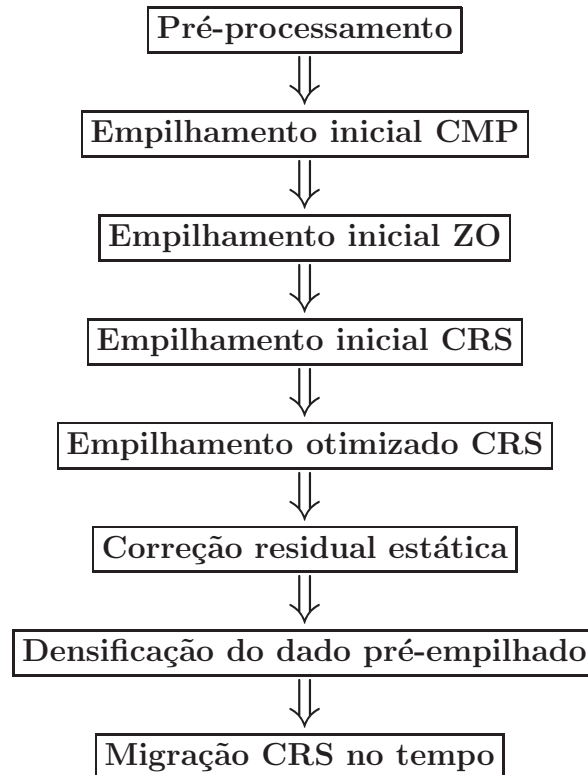
Figura 7.12: Seção migrada Kirchhoff na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha sobre a seção empilhada NMO (Figura 7.9), utilizando o modelo de velocidade da Figura 7.7, onde se observa a recuperação da subhorizontalização das estruturas, desenhada pela melhor continuidade dos eventos refletores, o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a recuperação de vários eventos refletores em grandes profundidades e a ausência de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”), existentes na migração da Figura 7.10. Devido a falta de informação na seção geológica a profundidade considerada foi de 5500m. O parâmetro de abertura lateral da migração usado foi de 300m.



7.2.2 Empilhamento CRS-2D

O processamento CRS da bacia do Jequitinhonha foi realizado parcialmente por Lima (2010), e complementado aqui como descrito no fluxograma da Figura 7.13, onde se mostra as técnicas aplicadas.

Figura 7.13: Etapas do fluxograma de empilhamento CRS aplicado à linha L2140266 do Jequitinhonha.



A tabela 7.2 mostra todos os parâmetros de processamento gerais utilizados, assim como os parâmetros usados nos processos de Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-empilhamento.

Tabela 7.2: Parâmetros utilizados para simulação ZO pelo empilhamento CRS e para os processos de Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-empilhamento da bacia do Jequitinhonha.

Parâmetros gerais	Valores
Medida de coerência	Semblance
Dado usado para análise de coerência	Traços normalizados

Velocidade e vínculos	Valores
Velocidade constante na superfície	1500m/s
Velocidades de empilhamento testadas	1400 à 6000m/s
Zona alvo	Valores
Tempos de trânsito para simulação ZO	0 à 7s
Intervalo de amostragem temporal	4ms
Número de traços ZO simulados	2167
Espaçamento entre traços ZO simulados	12.5m
Aberturas e suavização	Valores
Mínima abertura ZO	100m em 0.1s
Máxima abertura ZO	500m em 4.0s
Mínima abertura CMP	300m em 0.1s
Máxima abertura CMP	3125m em 4.0s
Tamanho relativo à suavização	30%
Busca automática de v_{EMP} em famílias CMP	Valores
Incremento no sobretempo inicial para grandes afastamentos	16ms
Número de iterações para o refinamento	3
Busca de β_0 e R_{NIP} na seção empilhada	Valores
Ângulos de emergência testados	-60° à 60°
Incremento do ângulo de emergência	1°
Número de iterações para o refinamento	3
Busca de R_N na seção empilhada	Valores
Incremento no sobretempo inicial para grandes afastamentos	8ms
Número de iterações para o refinamento	3
Deteção de mergulhos conflitantes	Valores
Número máximo de mergulhos conflitantes	3
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	0.06
Limite de coerência para tempos de trânsito grandes	0.03
Número máximo de iterações na otimização	100
Desvio máximo relativo para parada	10^{-4}

Varição inicial dos ângulos de emergência	6°
Varição inicial de R_{NIP}	5%
Varição inicial de R_N transformado	6°
Raio de transformação de R_N	100m
Correção estática residual	Valores
Tempo mínimo para a correlação cruzada	0.3s
Tempo máximo para a correlação cruzada	4.0s
Máximo deslocamento no tempo para a correlação cruzada	24ms
Densificação do dado pré-empilhamento	Valores
Intervalo entre receptores nas super-famílias geradas	25m

De acordo com a Figura 7.13, a aplicação do método CRS resulta nas seguintes seções CRS: otimizada (Figura 7.14); otimizada migrada (Figura 7.15), coerência (Figura 7.17), ângulo de emergência β^1 (Figura 7.18), R_N (Figura 7.19) e R_{NIP} (Figura 7.20).

O resultado do empilhamento CRS otimizado resultante do fluxograma 7.13 é mostrado na Figura 7.14, e quando comparado com a seção empilhada NMO da Figura 7.9 é possível visualizar melhor a continuidade dos eventos, onde se percebe uma significativa melhora com relação ao ruído e uma melhor visibilidade eventos em para grandes profundidades. A Figura 7.15 mostra o resultado da migração CRS no tempo baseada nos atributos do campo de onda, e se observa que as difrações evidentes na Figura 7.14 foram colapsadas e que não há arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). A seção possui pouca aparência granulada, o que acontece devido ao aumento da relação sinal/ruído proporcionada pelo processo de densificação do dado pré-empilhamento. Além disso, se percebe uma melhoria nas áreas para grandes tempos de trânsito, ocasionando assim um resultado mais expressivo da subsuperfície. A Figura 7.15 quando comparada com a seção empilhada CRS otimizada do Marmousi (Figura 6.18) mostra uma aparência com pouca granulação devido ao aumento da relação sinal/ruído, uma vez que ao Marmousi não foi aplicado a etapa de densificação.

À seção empilhada CRS otimizada da Figura 7.14 foi aplicado o modelo de velocidade obtido através da análise do mapa semblance no domínio do tempo (Figura 7.5) e se obteve a seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D em tempo (Figura 7.16), onde se observa muitas difrações e arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), principalmente para eventos

¹A unidade dos valores dos ângulos de emergência é o grau, e a unidade para os valores de raios de curvaturas das frentes de onda N e NIP é o metro.

em grandes profundidades, demonstrando a baixa qualidade da seção e a necessidade de se evoluir em busca de um melhor resultado.

É importante ressaltar que nas seções empilhadas e migradas a abertura ZO foi restrita à Primeira Zona de Fresnel Projetada, e se aplicou um ganho agc com uma janela de 0.5s e uma suavização gaussiana visando revelar eventos com baixa amplitude.

A seção coerência da Figura 7.17 mostra os eventos dominantes associados aos maiores valores de coerência que tem um máximo ao redor de 0.5. As seções ângulo de emergência e raio de curvatura da onda N são mostradas nas Figuras 7.18 e 7.19, respectivamente. Elas mostram claramente a separação entre as zonas de difração e de reflexão, e ambas estão diretamente relacionadas a mergulhos e curvaturas de eventos. A seção ângulo de emergência (Figura 7.18) apresenta como característica fortes difrações e se percebe uma nítida definição do fundo oceânico. Na seção raio de curvatura da onda N (Figura 7.19) se percebe uma clara divisão entre as zonas de difração e reflexão.

A seção raio de curvatura da onda NIP (Figura 6.23) mostra a estratificação da distribuição crescente do raio com o aumento do tempo de trânsito e a definição dos eventos de difração e das definições de contornos na zona rasa da seção. A seção se mostra ruidosa para grandes valores do tempo de trânsito.

A comparação entre os empilhamentos CRS do Jequitinhonha e do Marmousi (seção 6.2.2) mostra que a aplicação das etapas de Correção Residual Estática e Densificação do Dado Pré-Empilhamento fornece resultados com melhor qualidade de interpretação, visto que recupera eventos pouco ou nada visíveis, mostrando os refletores com maior grau de continuidade e tornando as difrações mais aparêntes.

Figura 7.14: Seção empilhada CRS otimizada da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa a boa continuidade dos eventos refletivos, e a grande quantidade de difrações, principalmente nas regiões mais profundas. Comparar com a Figura 7.9.

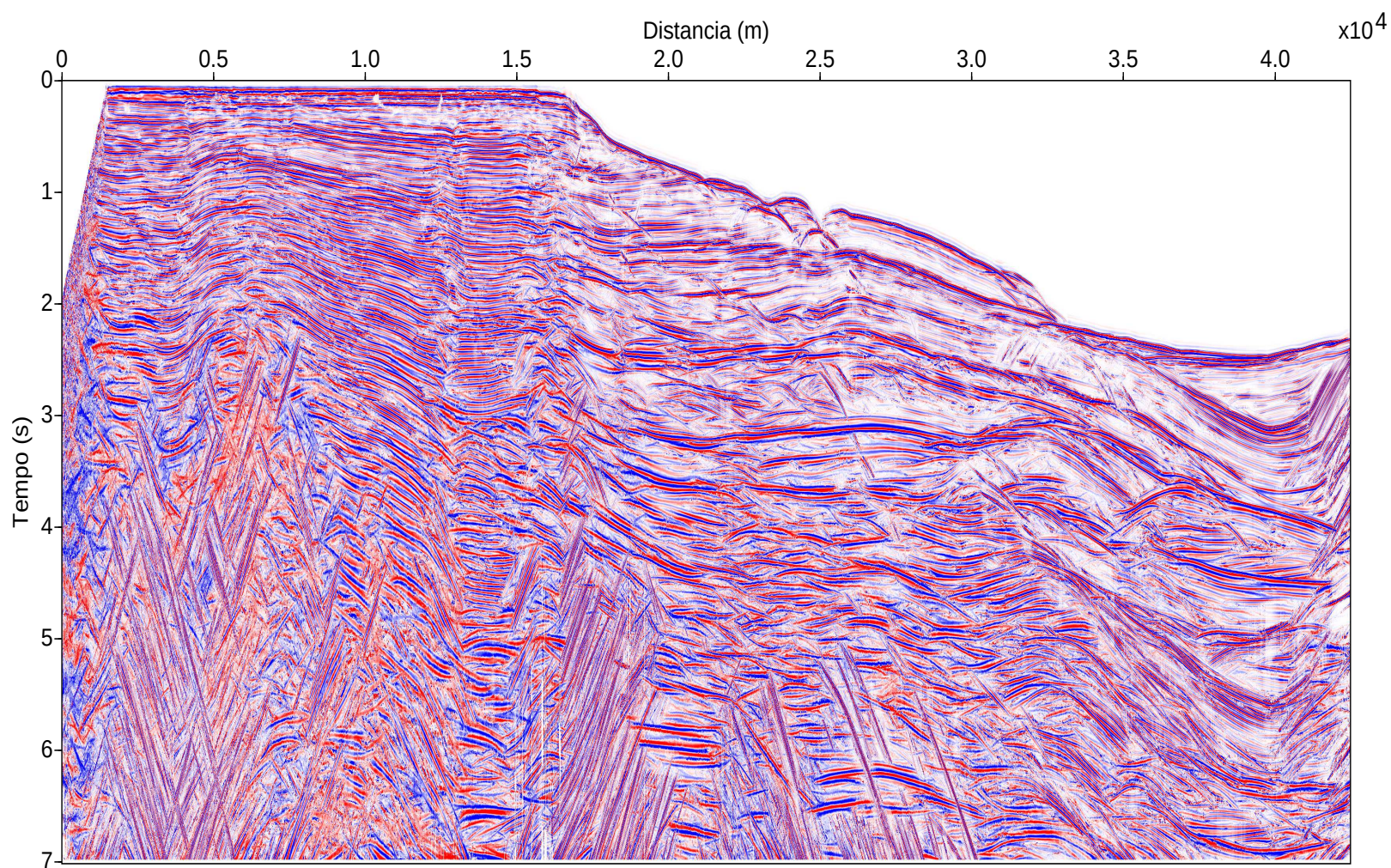


Figura 7.15: Seção empilhada CRS migrada da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso das difrações, a correção das falhas geológicas, a continuidade dos eventos refletidos, a grande quantidade de granulações e a ausência de arcos sobre os pontos difratores (“sorrisos”). Comparar com as Figuras 7.10 e 7.16.

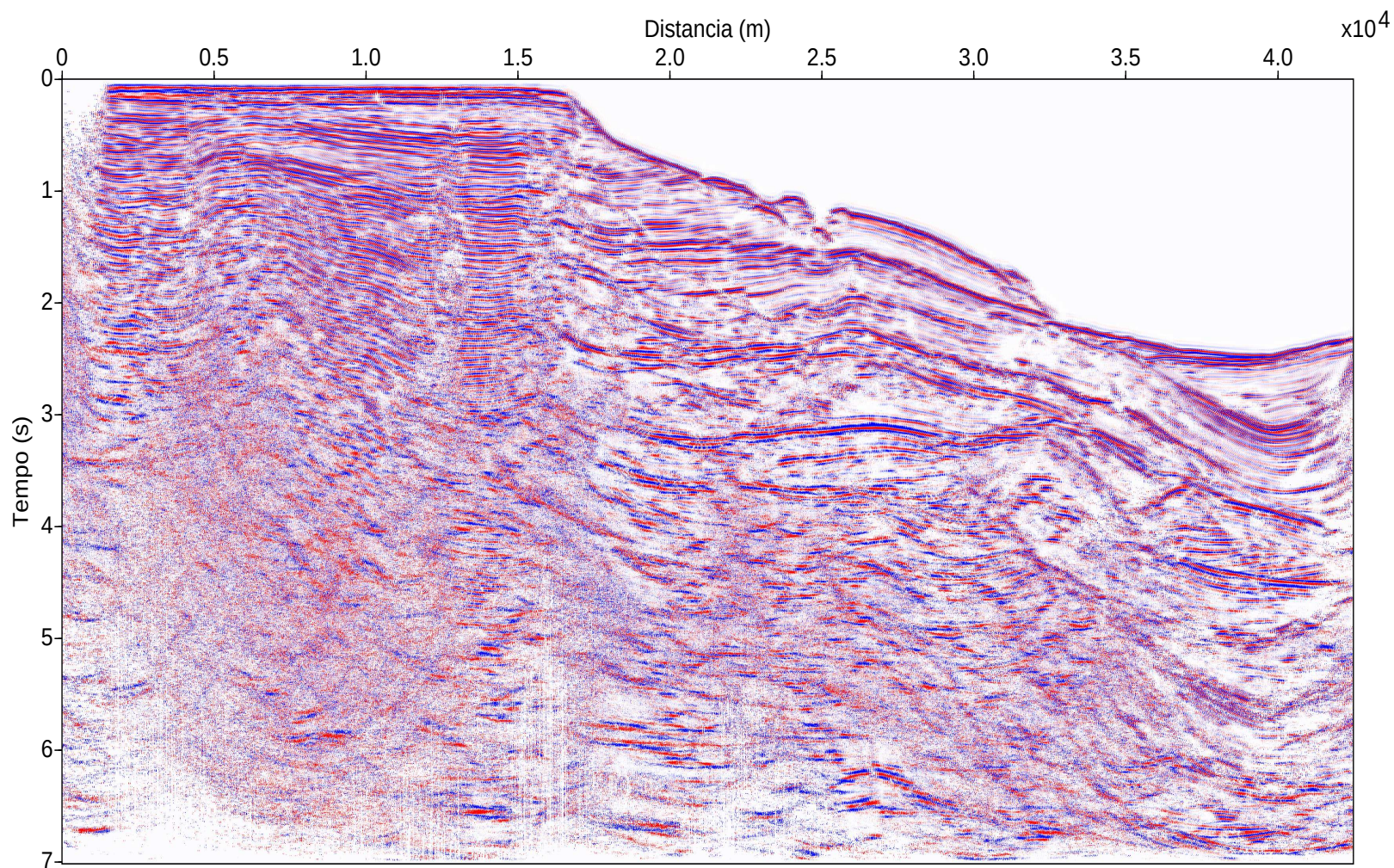


Figura 7.16: Seção migrada Kirchhoff no tempo utilizando o modelo de velocidade semblance da Figura 7.5 e a seção empilhada CRS otimizada da Figura 7.14, onde se observam muitas difrações e a grande quantidade de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), principalmente para eventos em grandes profundidades, demonstrando a baixa qualidade da seção e a incoerência da metodologia. Comparar com as Figuras 7.10 e 7.15.

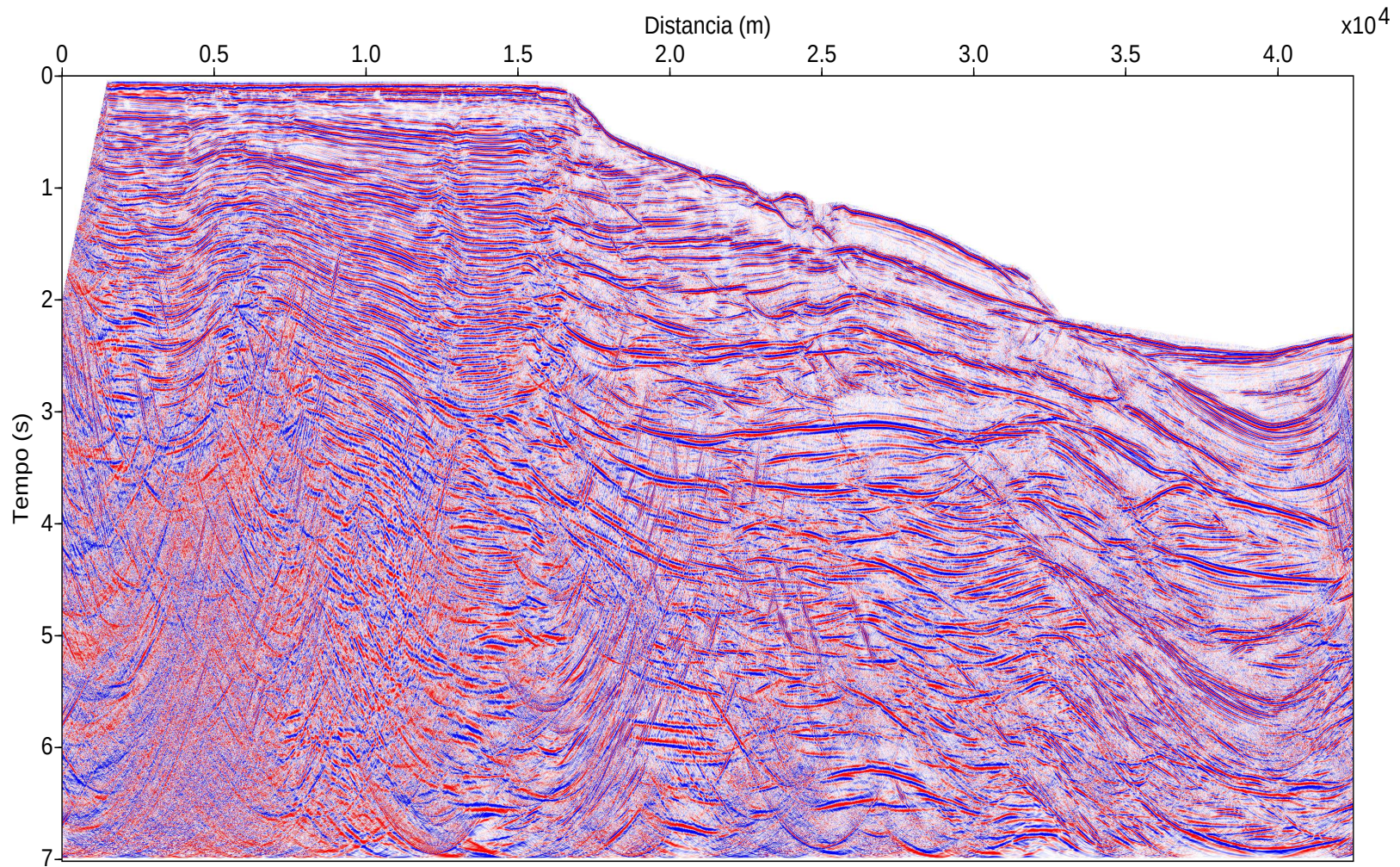


Figura 7.17: Seção coerência no empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha usando o mapa semblance.

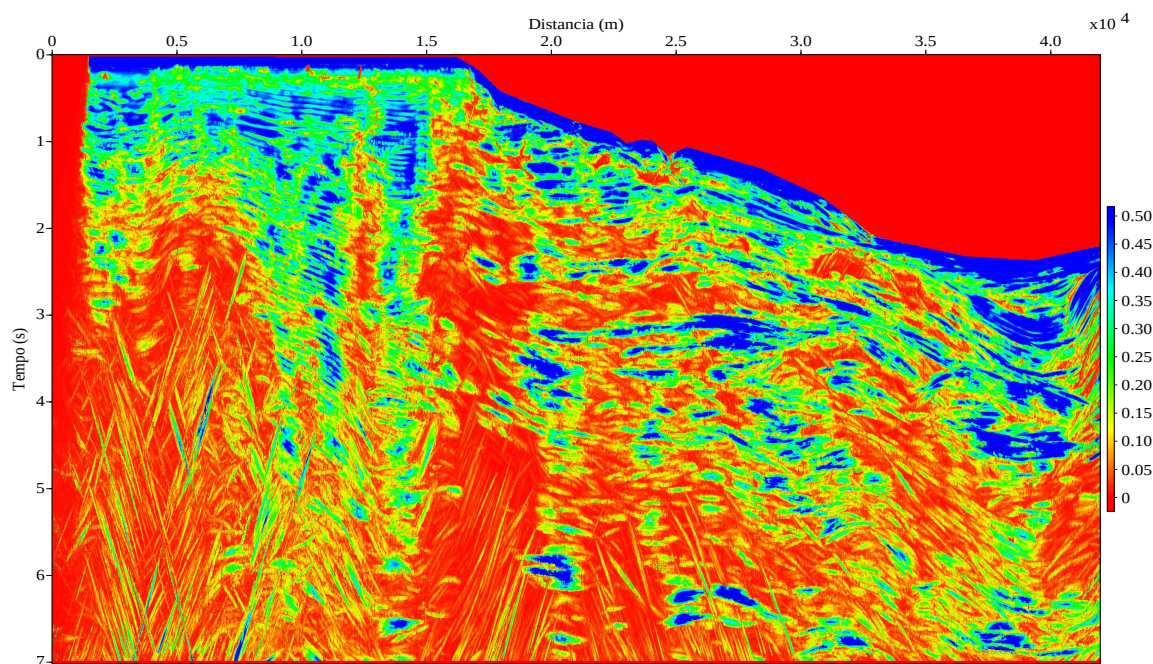


Figura 7.18: Seção ângulo de emergência β_0 (em graus) do empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha.

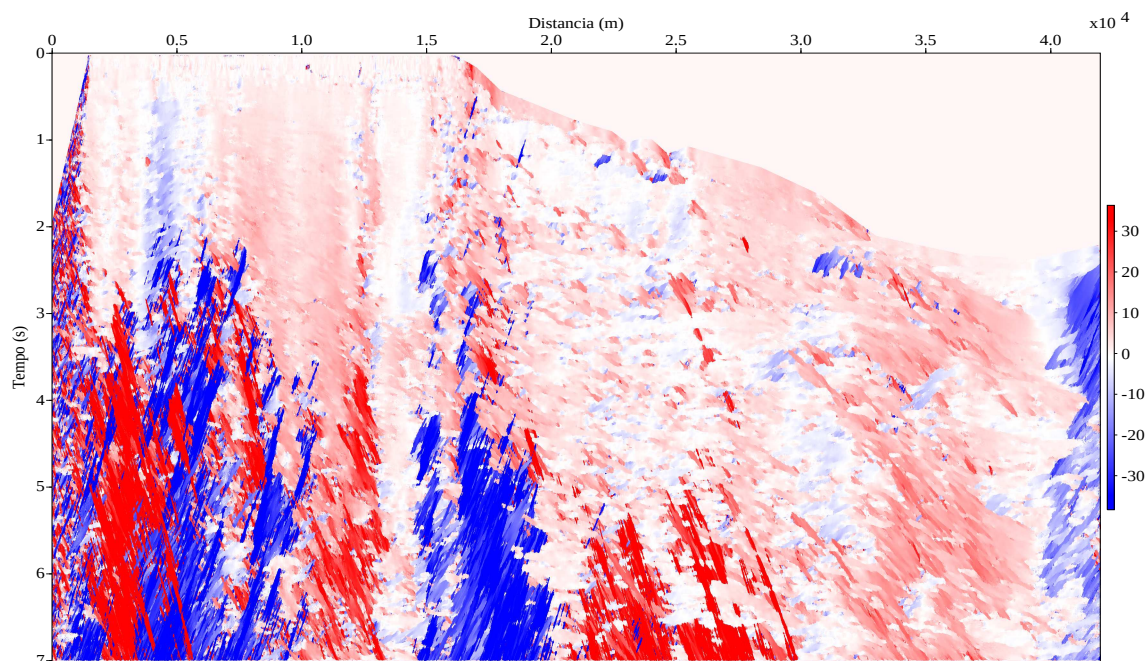


Figura 7.19: Seção raio de curvatura R_N (em m^{-1}) do empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha.

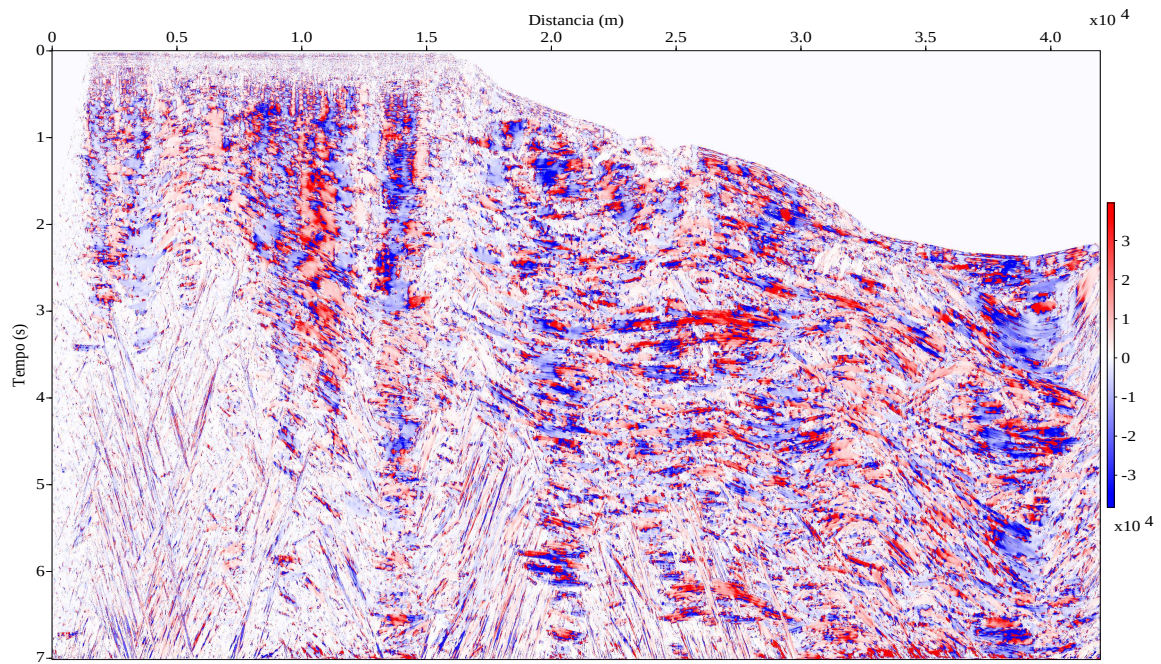
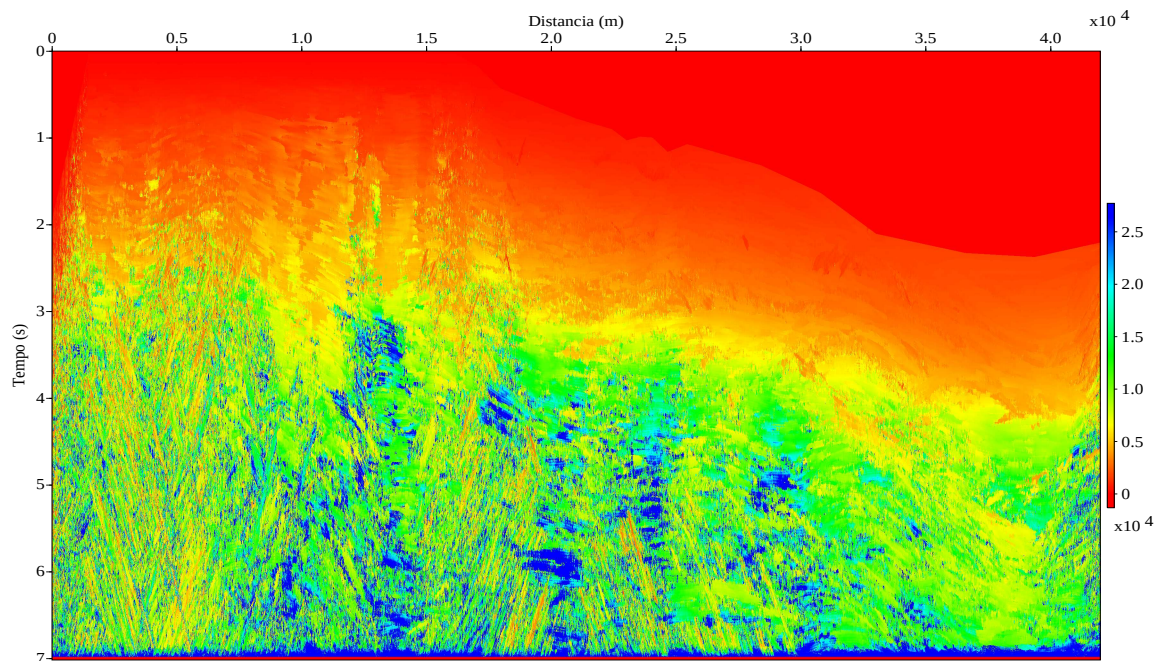


Figura 7.20: Seção raio de curvatura R_{NIP} (em m) do empilhamento CRS otimizado da linha L2140266 do Jequitinhonha.



7.3 NIPTOMOGRAFIA 2D

7.3.1 Modelo Inicial Linear

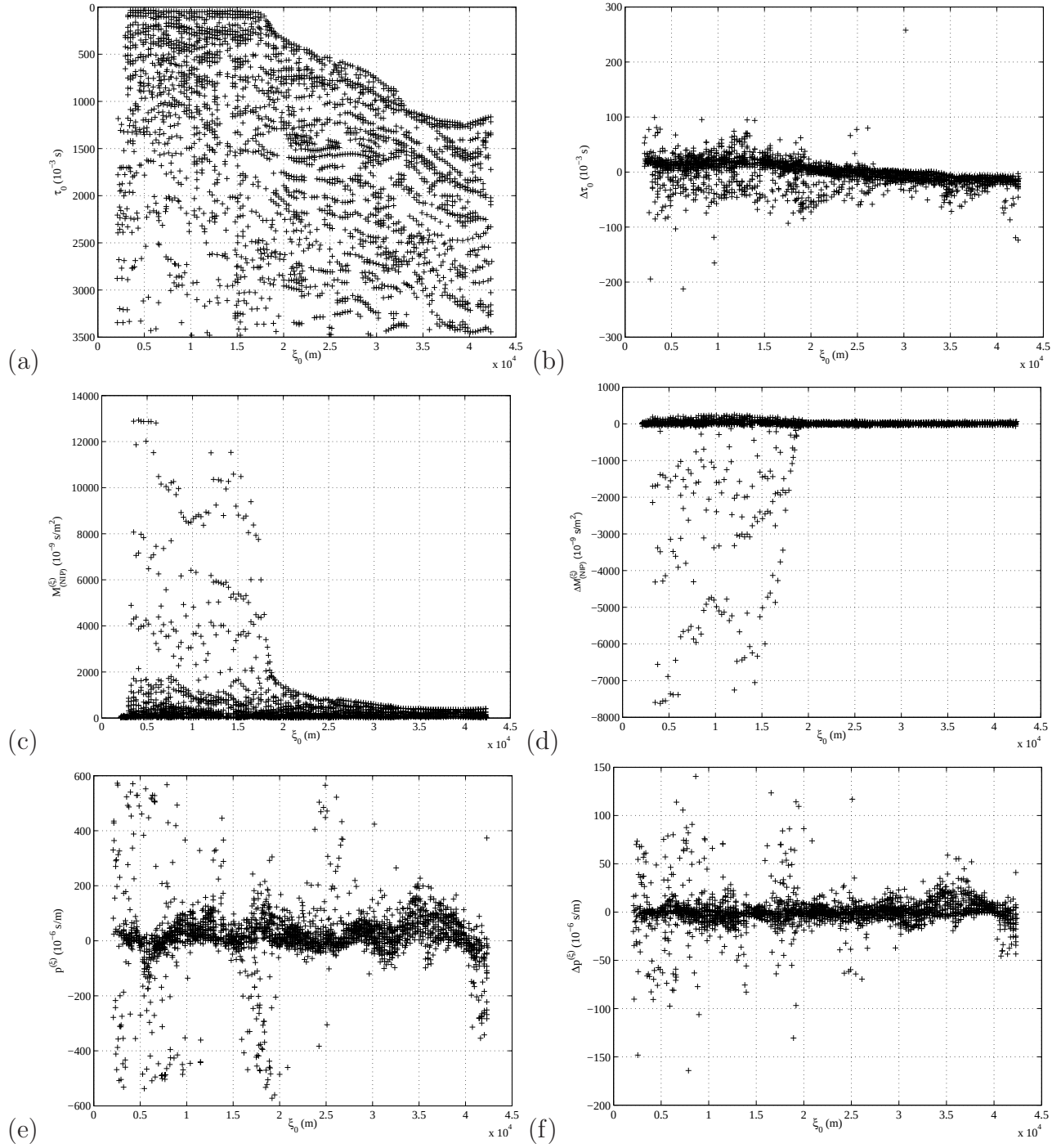
O método de inversão niptomográfica, descrito no fluxograma da Figura 5.4, necessita dos atributos extraídos automaticamente do empilhamento CRS (Figuras 7.14, 7.17, 7.18 e 7.20) para obter os parâmetros dos dados de entrada para a inversão. Utilizando a seção empilhada CRS otimizada do Jequitinhonha (Figura 7.14) foi realizada a primeira etapa da inversão niptomográfica, que consiste em marcações manuais dos eventos de reflexões primárias. Este processo resultou em 2970 pontos marcados no domínio (τ_0, ξ_0) de forma manual e automática que, em seguida, foram concatenados, cuja interpretação deve necessariamente evitar múltiplas e difrações. A quantidade de marcações neste dado é bem maior do que as feitas no Marmousi devido ao tempo de aquisição ser maior (7s) e, conseqüentemente, ter mais eventos para serem analisados. A tabela 7.6 mostra os parâmetros de controle utilizados para realizar a marcação automática dos pontos para inversão (DUVENECK, 2004).

O conjunto de equações (3.16), calculados a partir dos valores extraídos de R_{NIP} e β_0 da equação do tempo de trânsito hipérbolico para a situação de afastamento-comum (3.14), fornecem as componentes dos dados resultantes, $(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)})$, que são plotadas como uma função da localização do ponto de emergência ξ_0 (a quarta componente dos dados) nas Figuras 7.21a, 7.21c e 7.21e.

Tabela 7.6: Parâmetros utilizados para realizar a marcação automática dos pontos do Jequitinhonha.

Parâmetros	Valores
survel	1500m/s
radius	50m
timewidth	0.004s
mincoher	0.21
perc	0.99
fraction	0.10
maxpicks	100
skip	20
ampper	1.5
amptimewidth	0.6s

Figura 7.21: Dados de entrada da linha L2140266 do Jequitinhonha, e resíduos depois de 6 iterações. (a) Valores do componente τ_0 . (b) Erros residuais em τ_0 . (c) Valores do componente $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$. (d) Erros residuais em $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$. (e) Valores do componente $p^{(\xi)}$. (f) Erros residuais em $p^{(\xi)}$.



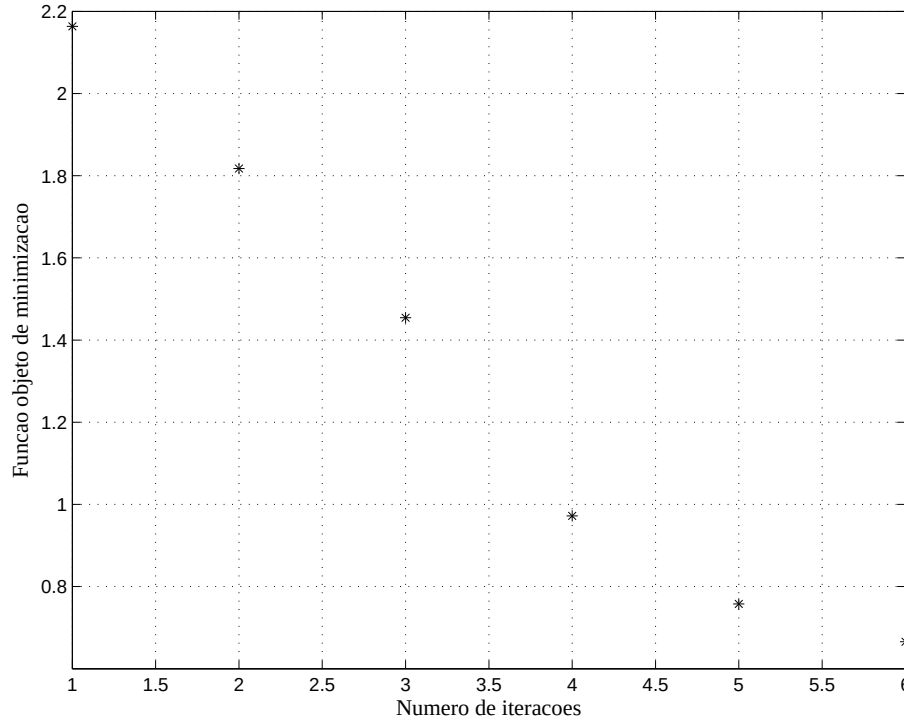
(DUVENECK, 2004) mostra que o fato dos diferentes componentes dos dados de entrada variarem suavemente ao longo dos eventos de reflexão permite que sejam considerados seguros. Como as 2970 marcações feitas na seção ZO do Jequitinhonha se encaixaram nesses requisitos, se utilizou tais pontos como entrada para a inversão niptomográfica.

O mapa de distribuição de velocidades para o Jequitinhonha foi definido por uma malha de $n_x \times n_z = 22 \times 8 = 176$ nós B-spline, com um espaçamento na direção horizontal de $dx = 2000m$ e na direção vertical de $dz = 1000m$. As coordenadas da seção empilhada CRS otimizada do Jequitinhonha (Figura 7.14) variam de $x = 1588m$ a $x = 42500m$ na horizontal e de $z = 0m$ a $z = 7000m$ na vertical. Como o programa *niptomo* (DUVENECK, 2003) estende as extremidades da malha para dx na extremidade horizontal esquerda, $2dx$ na extremidade horizontal direita e $3dz$ na direção vertical, o modelo de velocidades foi plotado em uma malha com aproximadamente $47000m$ de distância e $10000m$ de profundidade. Para o modelo inicial, usou-se $1500m/s$ para a velocidade inicial e um gradiente de velocidade vertical constante de $k = 0.56s^{-1}$ na função linear $v(t) = v_0 + k\Delta z$.

Os fatores de regularização finais adotados são $\varepsilon_{xx} = 0.8$ e $\varepsilon_{zz} = 0.2$, e um peso de regularização global que decresce iterativamente e é dado pela equação (6.1). Os valores para os fatores de escala (elementos da matriz diagonal covariante dos dados $\mathbf{C}_D$) são: $\sigma_\tau = 1$, $\sigma_M = 1$, $\sigma_p = 2$, e $\sigma_\xi = 1$. Os pesos dos vínculos adicionais introduzidos para reduzir a ambigüidade do problema de inversão são $\sigma_v = 1$ e $\sigma_{vq} = 0$.

A Figura 7.22 mostra a função objeto de minimização em função do número de iterações, onde se observa a redução do valor da respectiva função ao longo do processo de evolução devido à minimização do desajuste entre os parâmetros dos dados de entrada e os parâmetros do modelo.

Figura 7.22: Gráfico da função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações da inversão da linha L2140266. Foram executadas 6 iterações inversas não-lineares.

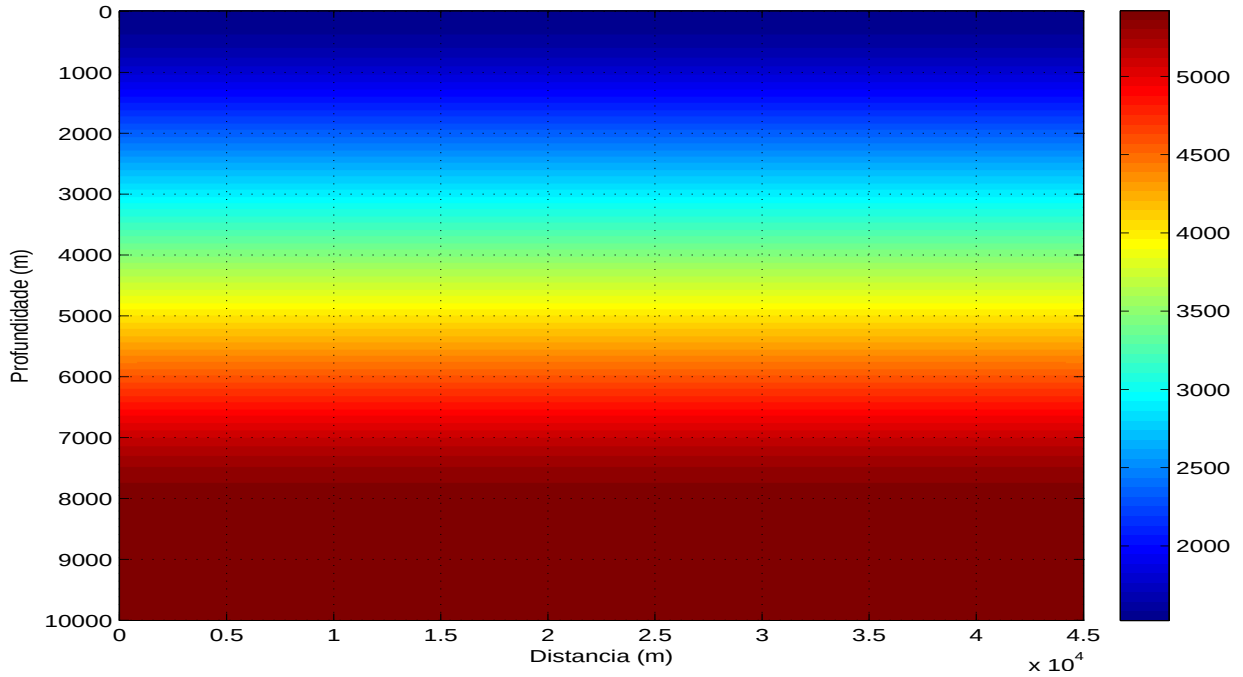


Os desajustes residuais finais nos componentes dos dados τ_0 , $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ e $p^{(\xi)}$ depois de 6 iterações, em função da localização do ponto de emergência ξ_0 , são mostrados nas Figuras 7.21b, 7.21d e 7.21f. Com o objetivo de avaliar esses erros dos dados residuais, eles precisam ser interpretados em função das magnitudes dos erros de medida que seriam esperados se os componentes dos dados forem determinados do dado sísmico pré-empilhado com uma análise de coerência e extraídos dos resultados do empilhamento CRS nas localizações dos picks selecionados.

É importante ressaltar que a coordenada horizontal (distância) da malha de todos os modelos de velocidade plotados nessa seção foi ajustada para $45000m$ e foi aplicado um parâmetro de suavização igual a 20 pontos. A coordenada vertical (profundidade) permaneceu com $10000m$.

A Figura 7.23 mostra o mapa de distribuição de velocidades inicial para a linha L2140266 do Jequitinhonha, estimado pela atribuição de valores significativos para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$, bem como da especificação dos fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados, dos pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , do gradiente de velocidade vertical constante k , da velocidade inicial v_0 e dos fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε .

Figura 7.23: Distribuição de velocidades inicial estimada pela atribuição de valores para os elementos de $\mathbf{m}^{(v)}$, bem como da especificação dos fatores de escala σ_τ , σ_M , σ_p e σ_ξ dos dados, dos pesos dos vínculos adicionais σ_v e σ_{vq} , do gradiente de velocidade vertical constante k , da velocidade inicial v_0 e dos fatores de regularização ε_{zz} , ε_{xx} e ε .



Nas Figuras 7.24 e 7.25 estão mostrados os resultados do modelo de velocidade niptomográfico final. Observar a definição do fundo oceânico, a distribuição dos valores de maiores velocidades nas regiões mais profundas da seção geológica e as curvas de nível mostrando os diferentes contrastes de velocidade.

As Figuras 7.26 e 7.27 mostram os pontos de incidência normal sobrepostos ao modelo de velocidade, representando os elementos refletores locais, obtidos a partir de marcações automáticas e manuais feitas sobre a seção empilhada CRS otimizada e calculados a partir dos parâmetros dos dados de entrada $(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)$ para a inversão. Os elementos refletores locais seguem a estrutura da subsuperfície real muito bem.

As Figuras 7.28 e 7.29 mostram o traçamento dos 2970 raios normais correspondendo aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)^{(\text{NIP})}$ final.

O pacote de processamento sísmico livre CWP/SU e o software computacional MATLAB foram utilizados para gerar estas figuras.

Figura 7.24: Resultado da inversão depois de 6 iterações para a distribuição de velocidade niptomográfica da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa que o fundo oceânico está bem destacado e a região de maior velocidade corresponde as regiões mais profundas da bacia. A comparação com a figura 7.7 mostra a melhor qualidade do modelo niptomográfico devido sua maior suavidade e à definição das diferentes variações de velocidade.

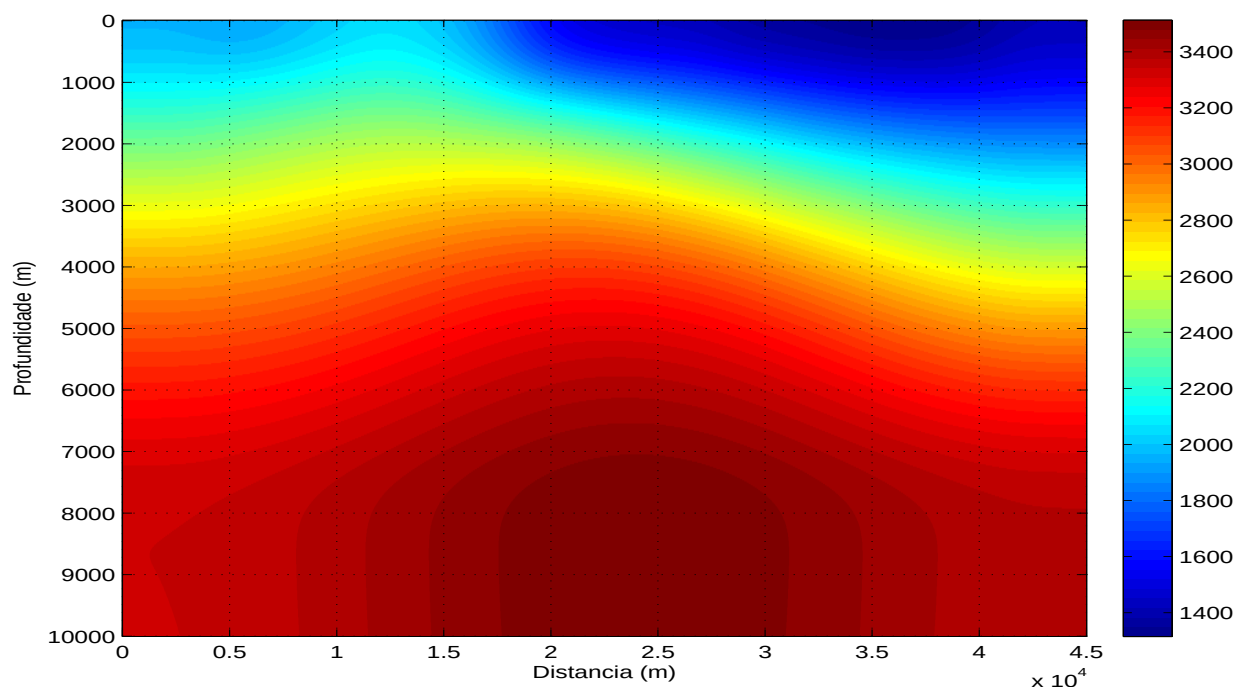


Figura 7.25: Figura 7.24 suavizada à 20 pontos.

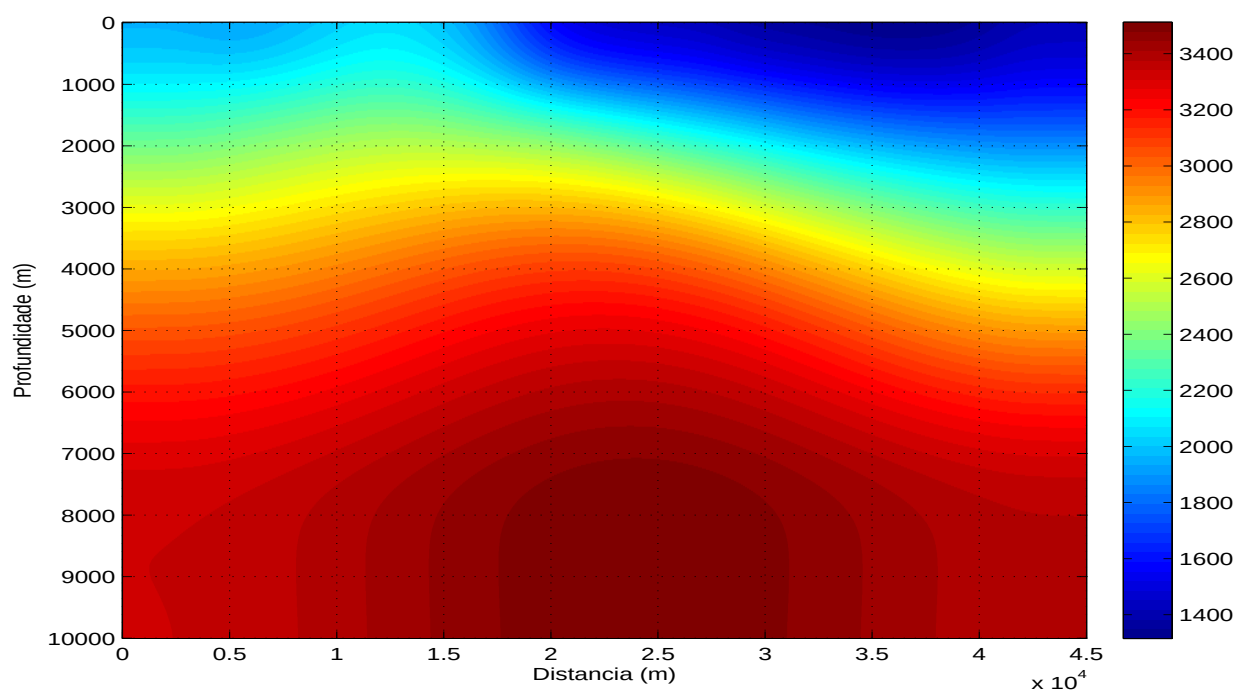


Figura 7.26: Resultado da inversão depois de 6 iterações mostrando os 2970 pontos de incidência normal sobrepostos ao modelo de velocidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa que as marcações na seção empilhada CRS otimizada foram feitas de forma homogênea nos eventos de reflexão primária.

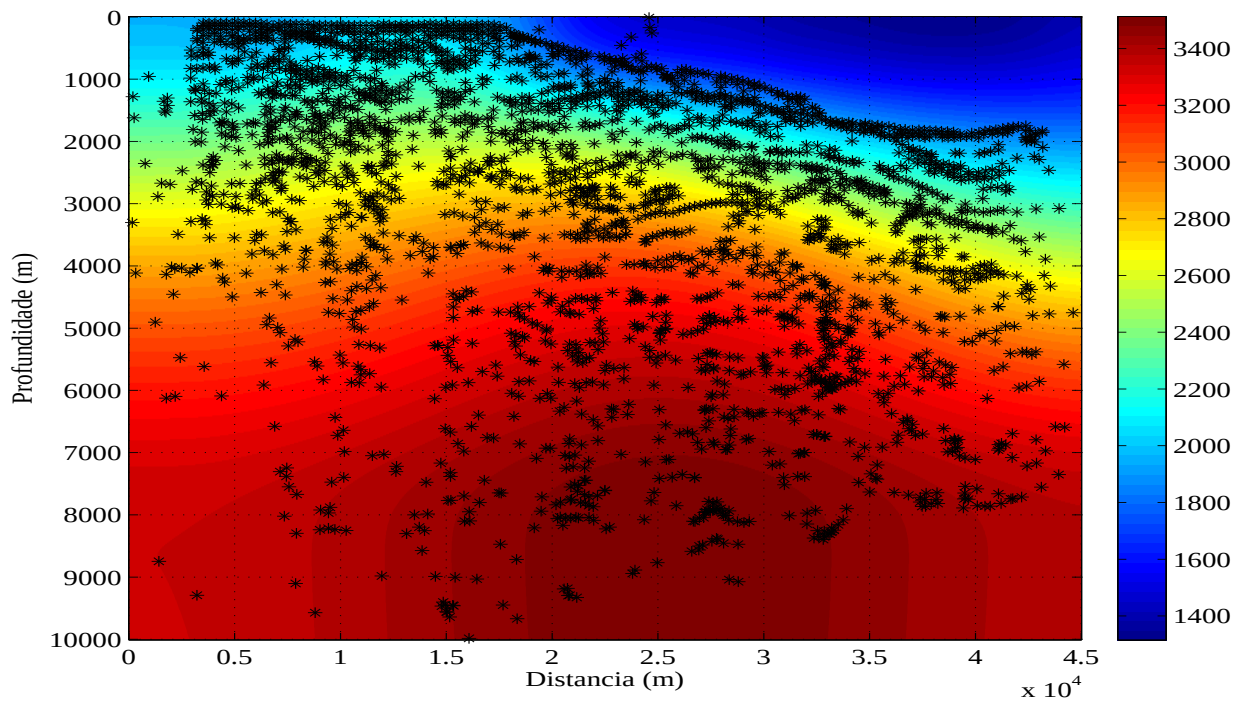


Figura 7.27: Figura 7.26 suavizada à 20 pontos.

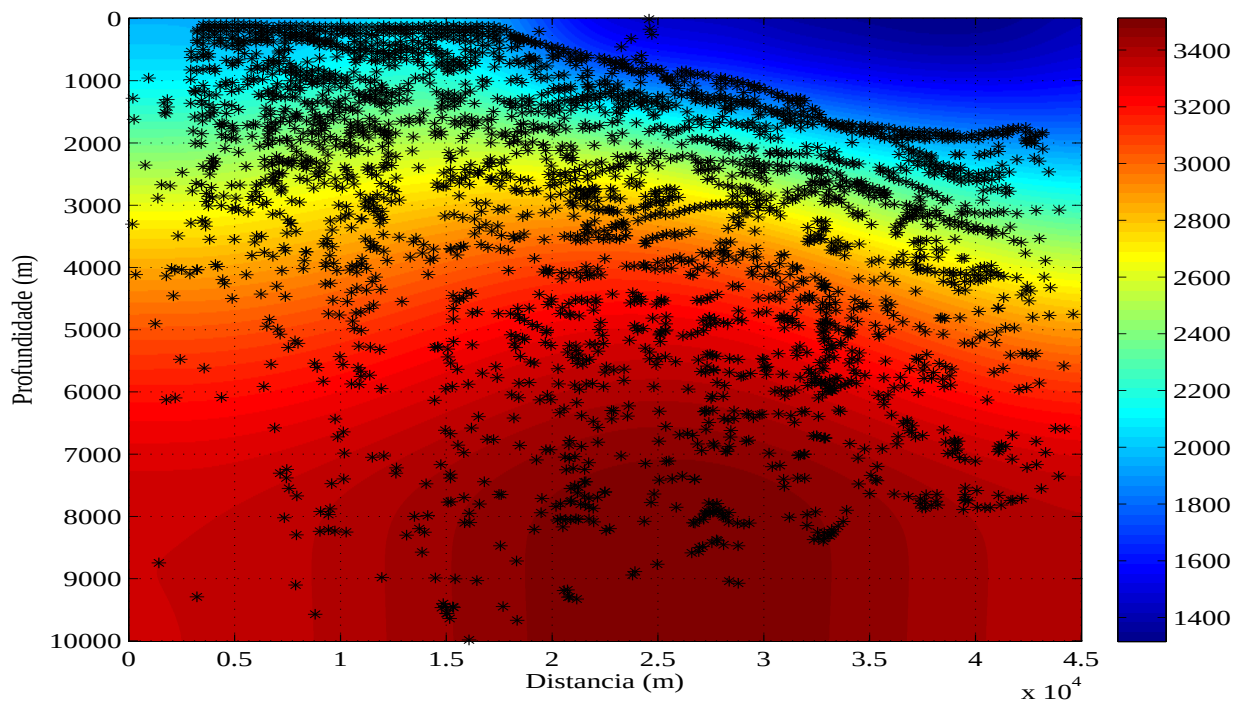


Figura 7.28: Resultado da inversão depois de 6 iterações mostrando o traçamento dos 2970 raios normais correspondendo aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)^{(NIP)}$ final.

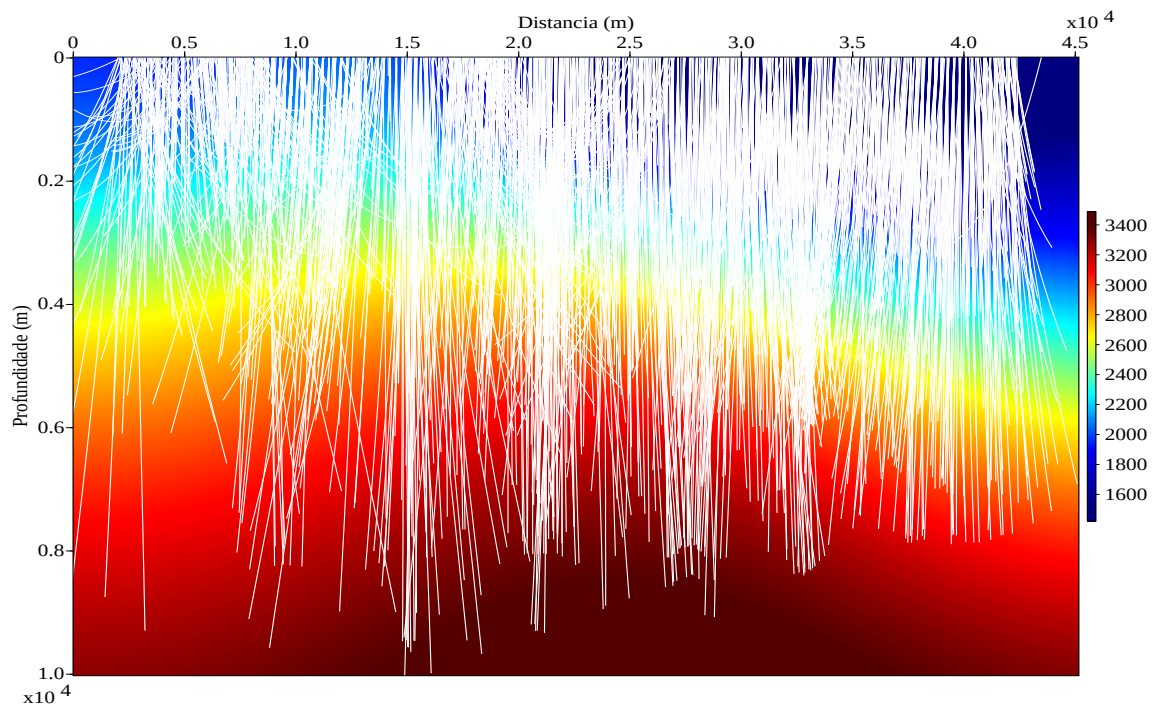
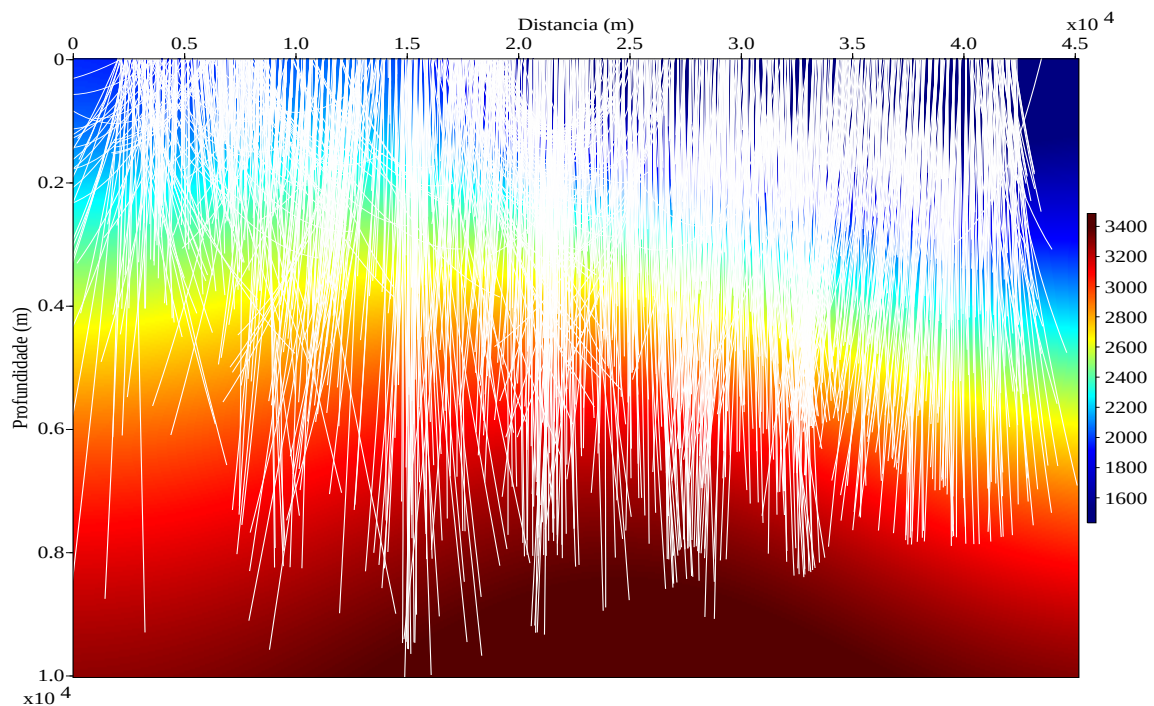


Figura 7.29: Figura 7.28 suavizada à 20 pontos.

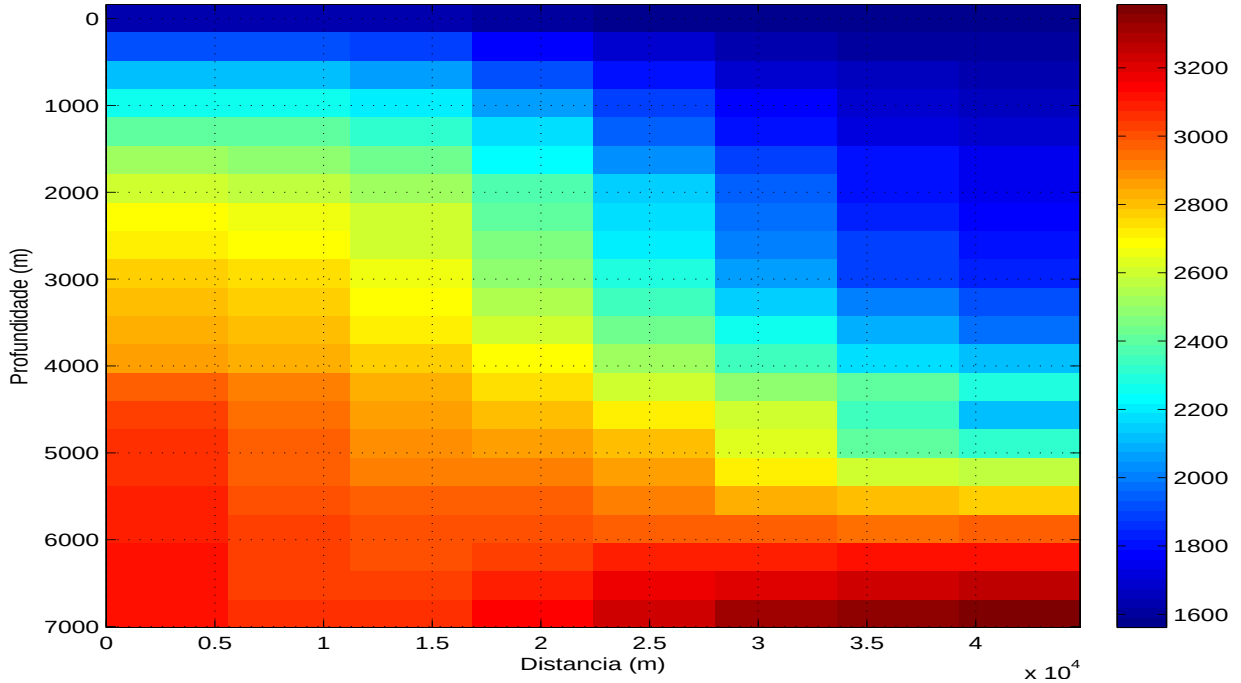


7.3.2 Modelo Inicial Semblance

O objetivo desta seção é aplicar o modelo de velocidade semblance (transformado para a profundidade) do Jequitinhonha (Figura 7.7) como modelo de partida da niptomografia para se obter a distribuição de velocidades para comparar com o caso do modelo inicial linear da Figura 7.25.

O modelo de velocidade semblance (em profundidade) da Figura 7.7 é dado por uma matriz de ordem (1750×3274) , e o primeiro passo foi reamostrá-la para as mesmas dimensões da malha niptomográfica, normalmente calculado com os valores $xknots$ e $zknots$ ($n_x \times n_z = 22 \times 8 = 176$ nós B-spline)². A reamostragem foi feita pela média aritmética da equação (6.2), com a razão igual a $N = 79$ na direção vertical e $M = 409$ na direção horizontal. Dessa forma, a matriz do modelo semblance (Figura 7.7) foi reamostrado para a ordem (22×8) , que resulta em 176 valores de velocidade (Figura 7.30) distribuídos ao longo da seção.

Figura 7.30: Mapa de distribuição de velocidades semblance em profundidade reamostrado utilizado como entrada na niptomografia. A reamostragem foi de (1750×3274) para (22×8) pontos da malha para traçamento de raios. Observar a pequena consistência com o modelo da Figura 7.7, principalmente na direção vertical, que possui somente 8 colunas, tornando a distribuição dos 176 valores de velocidade limitada a apenas 22 por coluna. Observe-se a coerência da variação dos valores de velocidade pelo paleta e o degradê.

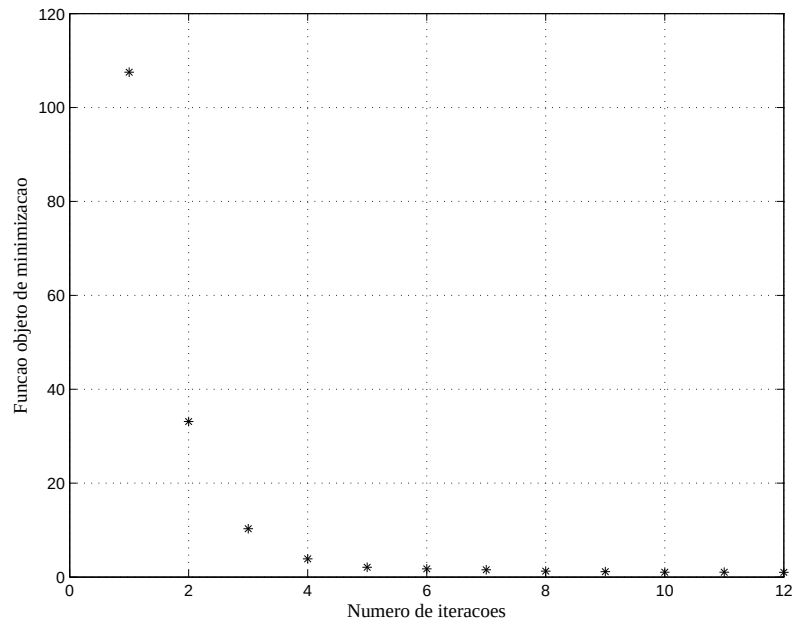


² n_x e n_z representam, respectivamente, o número de colunas e linhas da malha niptomográfica calculada.

A malha possui 176 nós B-spline e o arquivo do mapa de velocidade (Figura 7.30) contém 176 valores de velocidade, e para cada nó existe um determinado valor de velocidade. A matriz de ordem (176×3) tem na primeira coluna os valores de n_x , na segunda coluna os valores de n_z e na terceira coluna os valores de velocidade em cada nó da malha.

No programa *niptomo* (DUVENECK, 2004), o modelo inicial de velocidade qualquer, obedecendo a estrutura matricial, entra no parâmetro *vinput*, em vez dos parâmetros v_0 e $grad_0$ para o modelo linear. A Figura 7.31 exibe a evolução da função desajuste que apresenta seu menor valor na 12ª iteração. Ressalta-se o valor relativamente elevado da primeira iteração, igual a 107.534, e que a partir da sexta iteração o valor do desajuste se estabiliza ao redor de 1.8.

Figura 7.31: Função desajuste $S(\mathbf{m})$ em função do número de iterações da inversão, utilizando o modelo de velocidade semblance reamostrado (Figura 7.30) como entrada. Foram executadas 12 iterações inversas não-lineares, onde se observa a diferença entre os valores da primeira (107.534) e da última (1.02175) iteração, e a convergência da função a partir da sexta iteração (1.75874).

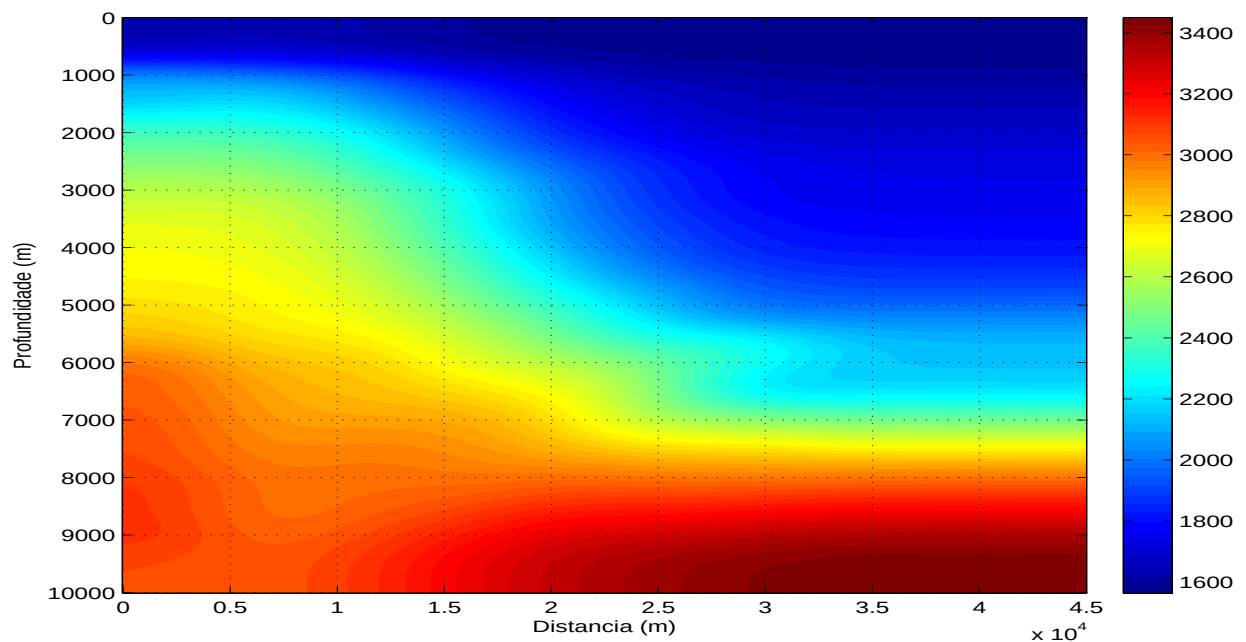


Na montagem da inversão, os modelos de velocidade inicial e final tiveram uma extensão de 4000m na horizontal e 3000 na vertical em cada extremidade da malha para evitar efeitos de borda, ficando ao final do processo com 47000m de distância e 10000m de profundidade. Para comparação, na seção anterior a coordenada horizontal (distância) da malha foi ajustada para 45000m e a coordenada vertical (profundidade) permaneceu com 10000m.

A Figura 7.32 mostra o mapa de distribuição de velocidades niptomográfico, considerada final do Jequitinhonha obtido a partir do uso do modelo semblance reamostrado (Figura

7.30). Se observa os maiores valores na região mais profunda. Comparando com a Figura 7.25, se observa que os modelos em comparação são consistentes.

Figura 7.32: Resultado da inversão com 12 iterações da distribuição de velocidade niptomográfica do Jequitinhonha, onde o modelo semblance reamostrado (Figura 7.30) foi utilizado como modelo inicial. Consistentemente, as maiores velocidades estão nas partes mais profundas. A comparação mostra que este mapa, em relação ao da Figura 7.7, apresenta melhor qualidade visual devido à suavização para se obter a malha da inversão.



7.4 MIGRAÇÃO

A informação no dado empilhado CRS otimizado do Jequitinhonha (Figura 7.14) está compreendida no intervalo entre $1588m$ e $42500m$ na direção horizontal, e entre 0 e $7000m$ na direção vertical. No entanto, seu modelo de velocidades niptomográfico (Figura 7.25) contém $47000m$ de distância e $10000m$ de profundidade, visto que está plotado em função do acréscimo aplicado a malha para evitar efeitos de borda. Visando um resultado para a seção migrada com a máxima qualidade possível, a seção empilhada CRS (Figura 7.14) teve sua coordenada horizontal ajustada entre 0 e $42500m$ usando o programa *sushw* do sistema CWP/SU, os modelos das Figuras 7.25 e 7.30 foram reajustados para os valores dos limites da seção CRS, estão mostrados nas Figuras 7.33 e 7.34 e foram utilizados para obter as seções migradas das Figuras 7.36, 7.37, 7.39, 7.40, 7.41.

Na Figura 7.35 está mostrado o modelo de velocidade semblance suavizado do Jequitinhonha (Figura 7.7) convertido para profundidade, cujas coordenadas possuem os mesmos limites da malha da Figura 7.33. O objetivo é aplicá-lo no empilhamento CRS (Figura 7.14) para se obter uma seção migrada na profundidade (Figura 7.38) que sirva de referência à respectiva seção obtida a partir dos modelos de velocidades niptomográficos (Figuras 7.33 e 7.34).

A Figura 7.36 mostra o resultado da migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade. Comparando este resultado com as Figuras 7.12 e 7.16, em termos qualitativos, e com a Figura 7.12, em termos quantitativos, se observa que a Figura 7.36 possui melhor qualidade visual, os refletores foram reposicionados e têm boa continuidade, não existem arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”) e as difrações foram colapsadas.

A Figura 7.37 mostra o resultado da migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade usando o mapa de velocidade semblance reamostrado (Figura 7.34) como entrada, onde se observa a baixa qualidade da seção devido muitas regiões de baixa frequência. Observa-se que as difrações foram colapsadas, as falhas geológicas corrigidas, os eventos refletores horizontalizados e a ausência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). A comparação com a Figura 7.36 mostra uma grande consistência entre as seções, evidenciando a coerência da metodologia.

A Figura 7.38 mostra o resultado da migração Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade usando o mapa de velocidade semblance (Figura 7.35), onde se observa a baixa qualidade da seção devido muitas regiões de baixa frequência. Observa-se que as difrações foram colapsadas, as falhas geológicas corrigidas, os eventos refletores horizontalizados e a

ausência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). Comparando este resultado com a Figura 7.16, em termos qualitativos, se observa o desaparecimento das granulações e difrações, e com a Figura 7.36, em termos quantitativos, temos uma coerência razoável entre as seções, devido a baixa qualidade visual da Figura 7.38, demonstrando a evolução do modelo de velocidade niptomográfico (Figura 7.33). É importante ressaltar o bom reposicionamento dos refletores nas Figuras 7.38 e 7.36.

A abertura lateral da migração foi definida por tentativa-e-erro, e o valor escolhido de 300m para as Figuras 7.36 e 7.38 mostra sua importância no processo de reposicionamento dos refletores, no colapso das difrações e na tentativa de se evitar os indesejados “sorrisos” ao longo dos eventos refletores. Por conta da influência direta no resultado da seção, se atribuiu alguns valores para o parâmetro de abertura objetivando discutir sua importância.

Na Figura 7.39 o valor atribuído para a abertura foi 12.5m, onde se observa que as difrações não foram colapsadas, as falhas geológicas não foram corrigidas e a seção não sofreu alteração.

Na Figura 7.40 o valor utilizado para a abertura foi 100m, onde se observa que as difrações foram parcialmente colapsadas, no entanto ainda se observa a presença desses eventos indesejados.

Na Figura 7.41 o valor utilizado para a abertura foi 600m, onde se observa que as difrações foram colapsadas em toda a seção sísmica, contudo surgem inúmeros arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), inviabilizando a escolha desse valor para o parâmetro em foco.

Na Figura 7.36 foi realizada uma análise geométrica na principal seção da bacia do painel de migração e o resultado está mostrado na Figura 7.42, cuja profundidade foi limitada a 5.5km. As linhas de interpretação mostram os principais eventos de reflexão e as descontinuidades em linhas amarelas, as anticlinais e falhas geológicas em linhas verdes e o contato dos sedimentos/embasamentos em linhas pretas. Para uma melhor análise e interpretação, é importante que os mapas tenham escala apropriada, exageração dos eixos e tamanho, além de uma informação geológica a priori. Além disso, a parte esquerda da seção precisaria de mais atenção para as estruturas serem melhor reconhecidas sob o modelo proposto. Pode-se ver que a característica mais proeminente de difração no lado esquerdo foi colapsada, e alguns eventos de reflexão aparecem agora.

Todas as seções migradas estão com ganho agc (*automatic gain control*), com uma janela de 0.5s, aplicados para melhorar a visualização dos resultados (revelar eventos com baixa amplitude) e foram geradas no sistema CWP/SU.

Figura 7.33: Modelo de velocidade niptomográfico da Figura 7.25 utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para 42500m de distância e 7000m de profundidade.

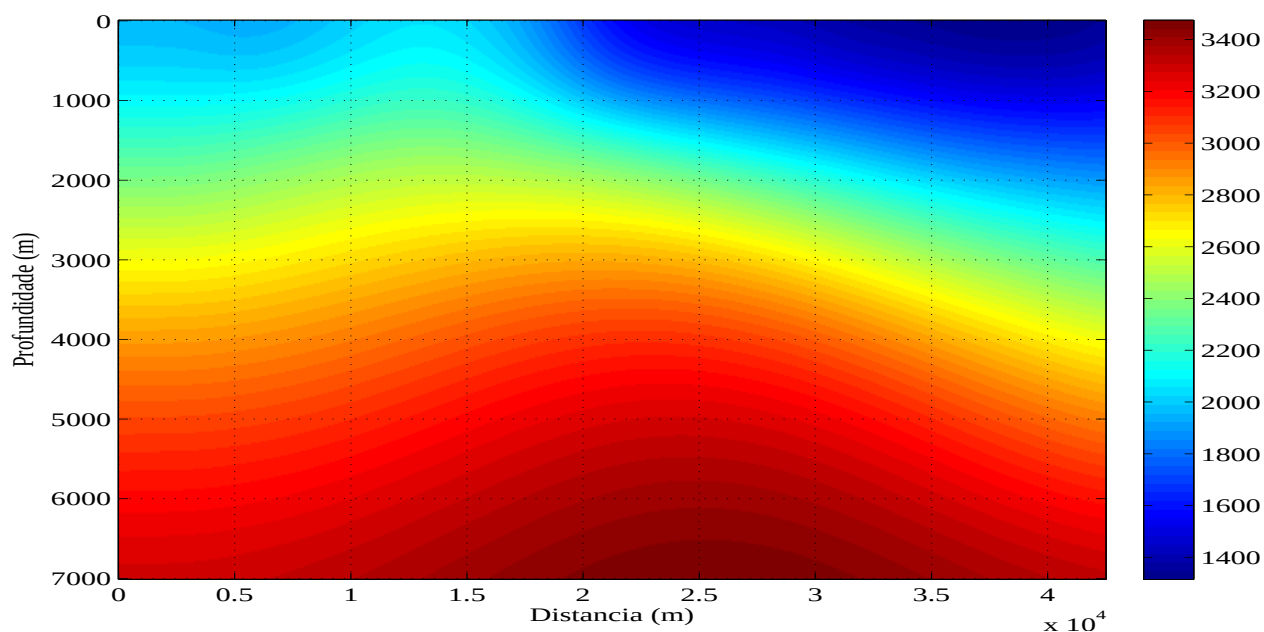


Figura 7.34: Modelo de velocidade niptomográfico da Figura 7.30, obtido a partir da aplicação do modelo semblance reamostrado (Figura 7.30) como entrada, utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde os limites da malha foram reajustados para 42500m de distância e 7000m de profundidade.

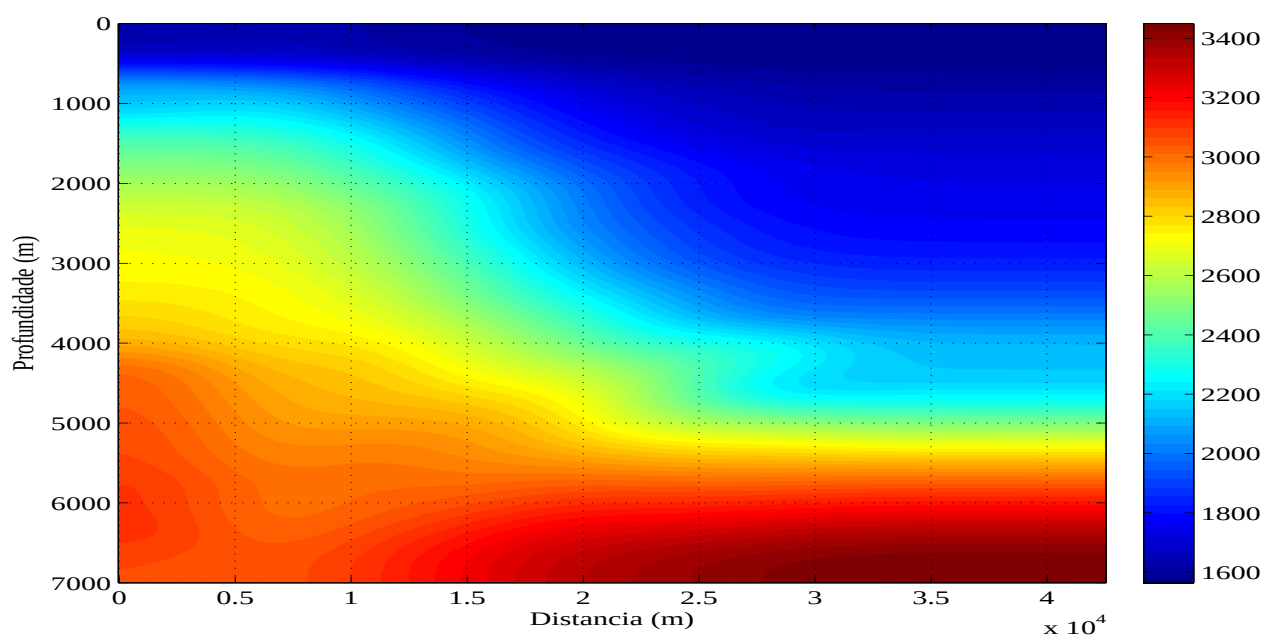


Figura 7.35: Modelo de velocidade semblance da Figura 7.7 utilizado para realizar a migração Kirchhoff na profundidade, onde se observa a boa consistência com os modelos das Figuras 7.33 e 7.34. Os limites da malha possuem os mesmos valores das coordenadas da Figura 7.33.

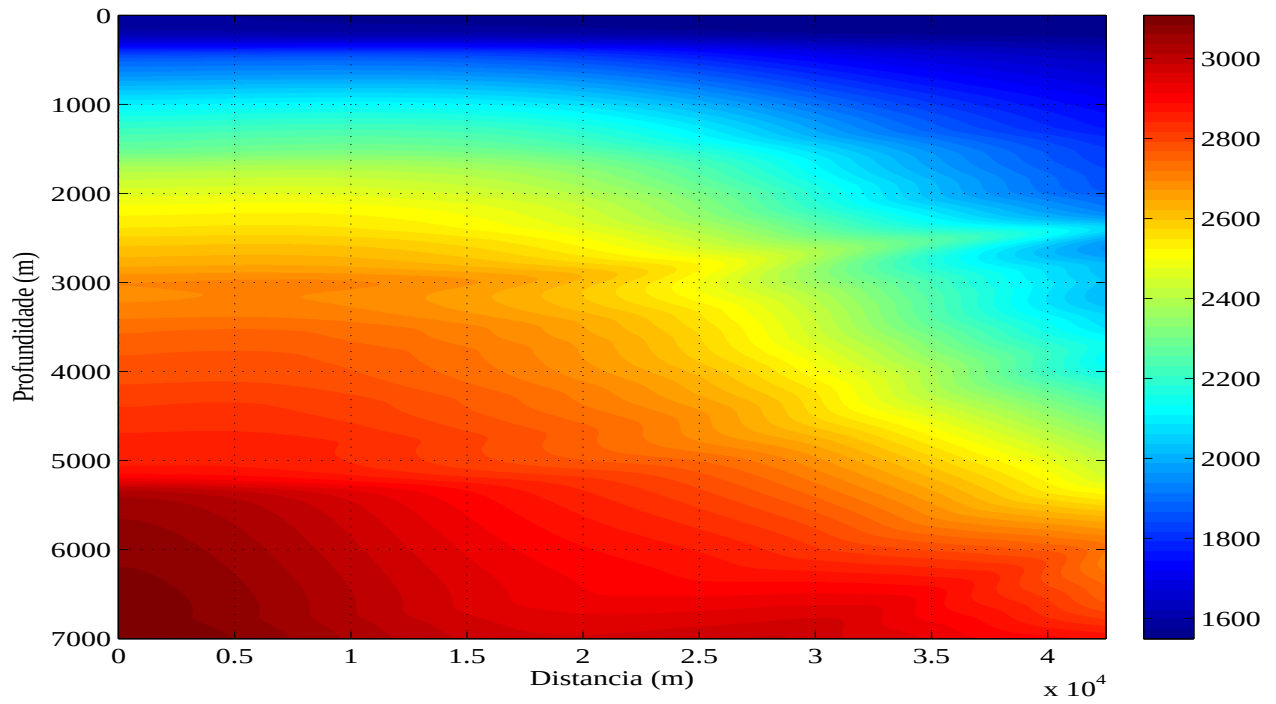


Figura 7.36: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso das difrações nas regiões mais profundas da bacia e a ausência de arcos acima dos pontos de difração (“sorrisos”). O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 300m.

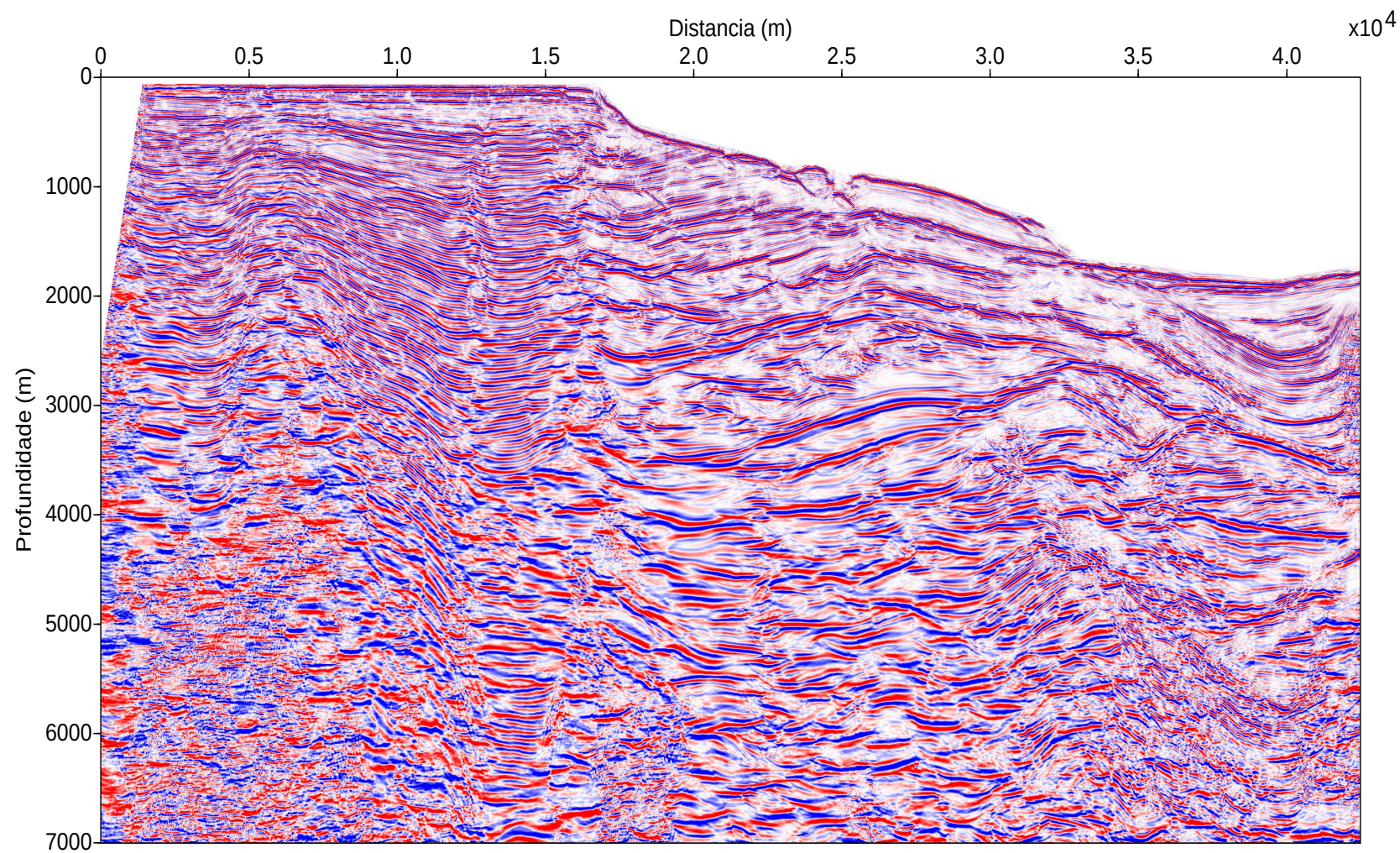


Figura 7.37: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, utilizando o modelo de velocidade semblance da Figura 7.34, onde se observam muitas regiões de baixa frequência, o colapso das difrações e a ausência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). A seção mostra uma baixa qualidade visual em relação a Figura 7.36, demonstrando que o modelo de velocidade (Figura 7.34) utilizado para obter esta seção, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 7.33, possui grandes limitações. O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de $300m$.

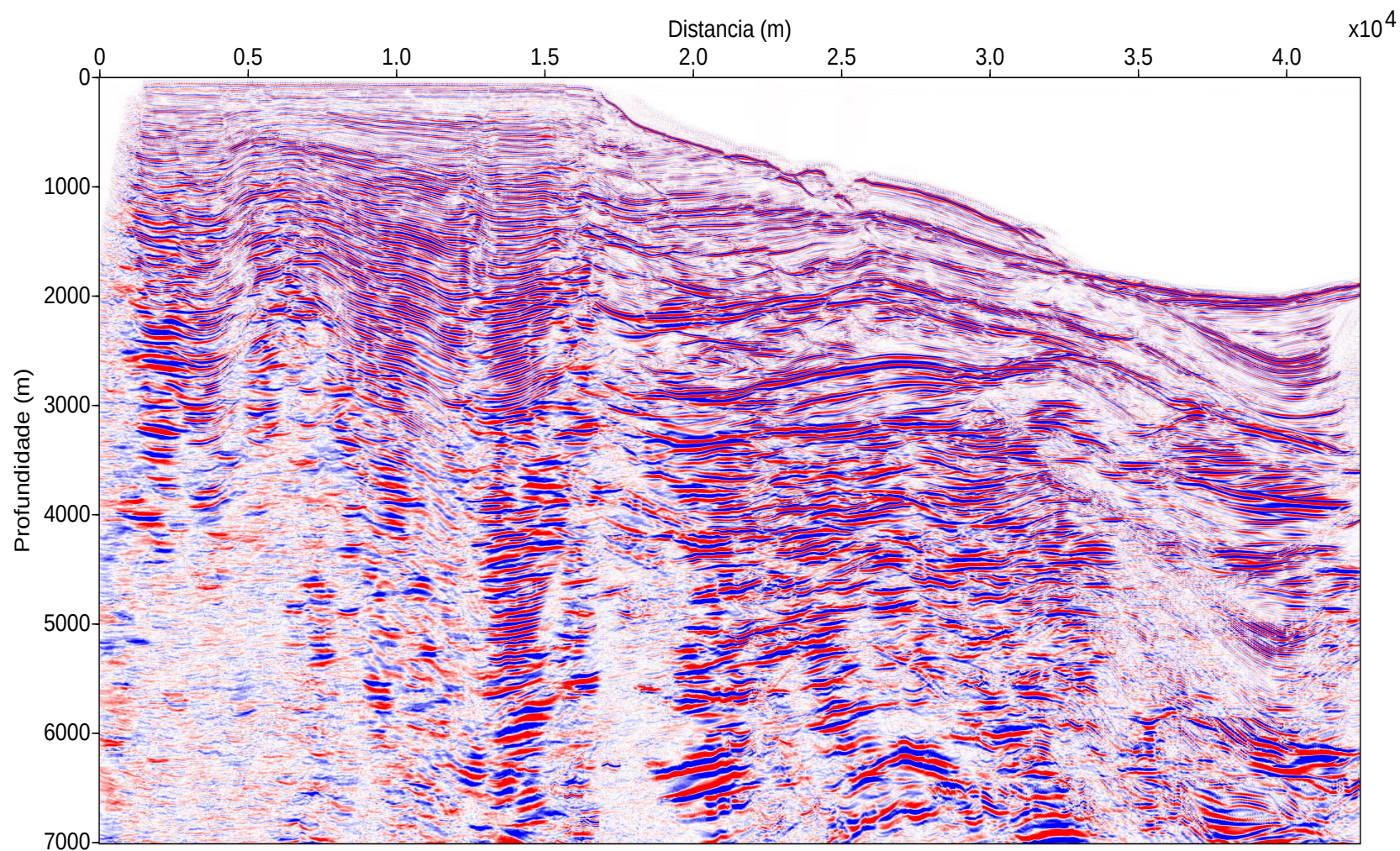


Figura 7.38: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, utilizando o modelo de velocidade semblance (Figura 7.35), onde se observam muitas regiões de baixa frequência, o colapso das difrações e a ausência de arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”). A seção mostra uma baixa qualidade visual em relação a Figura 7.36, demonstrando que o modelo de velocidade (Figura 7.35) utilizado para obter esta seção, apesar da boa consistência com o mapa de velocidade da Figura 7.33, possui grandes limitações. O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de $300m$.

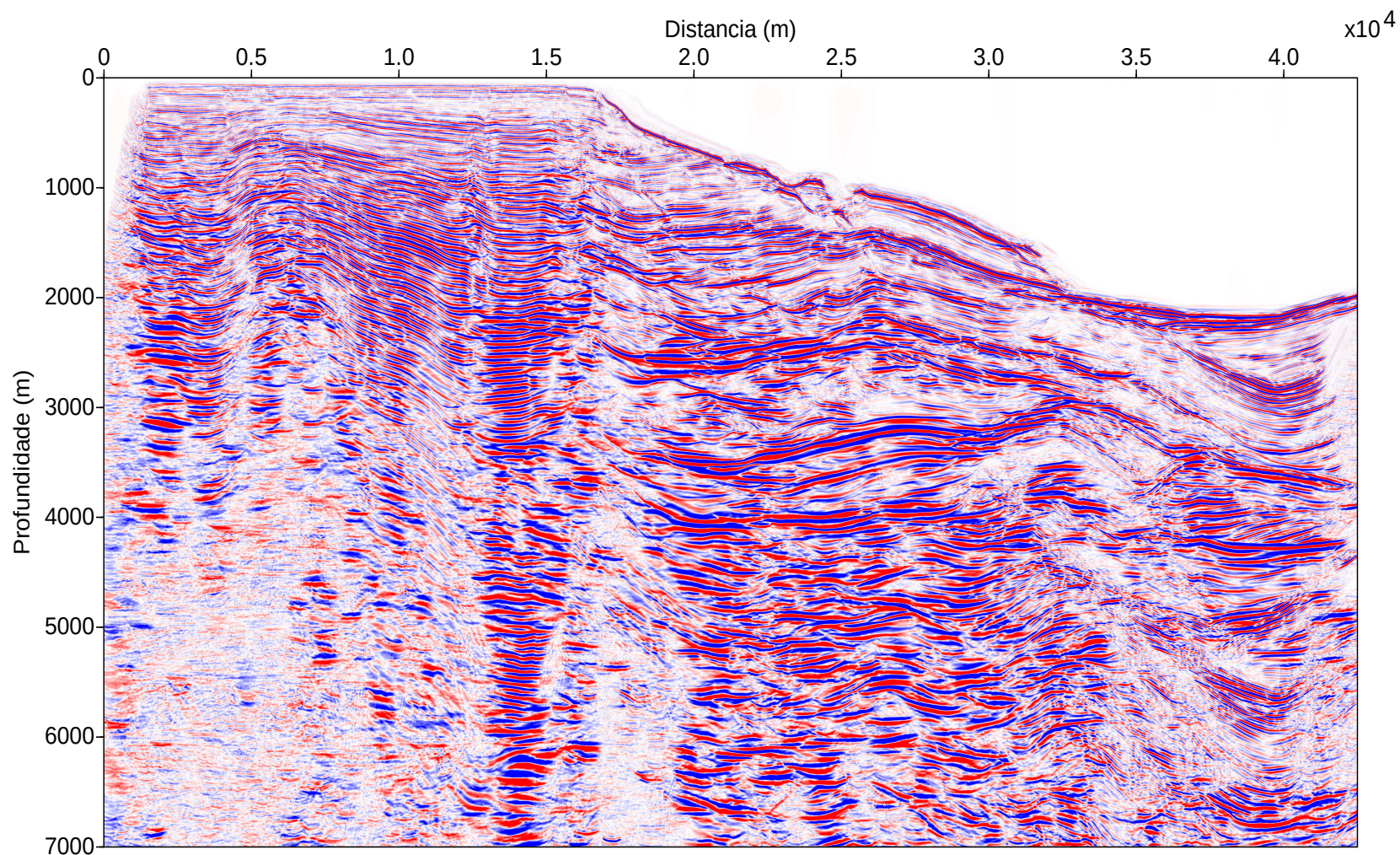


Figura 7.39: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa que as difrações não foram colapsadas (comparar com a Figura 7.36), e a seção não sofreu nenhuma alteração. O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de $12.5m$.

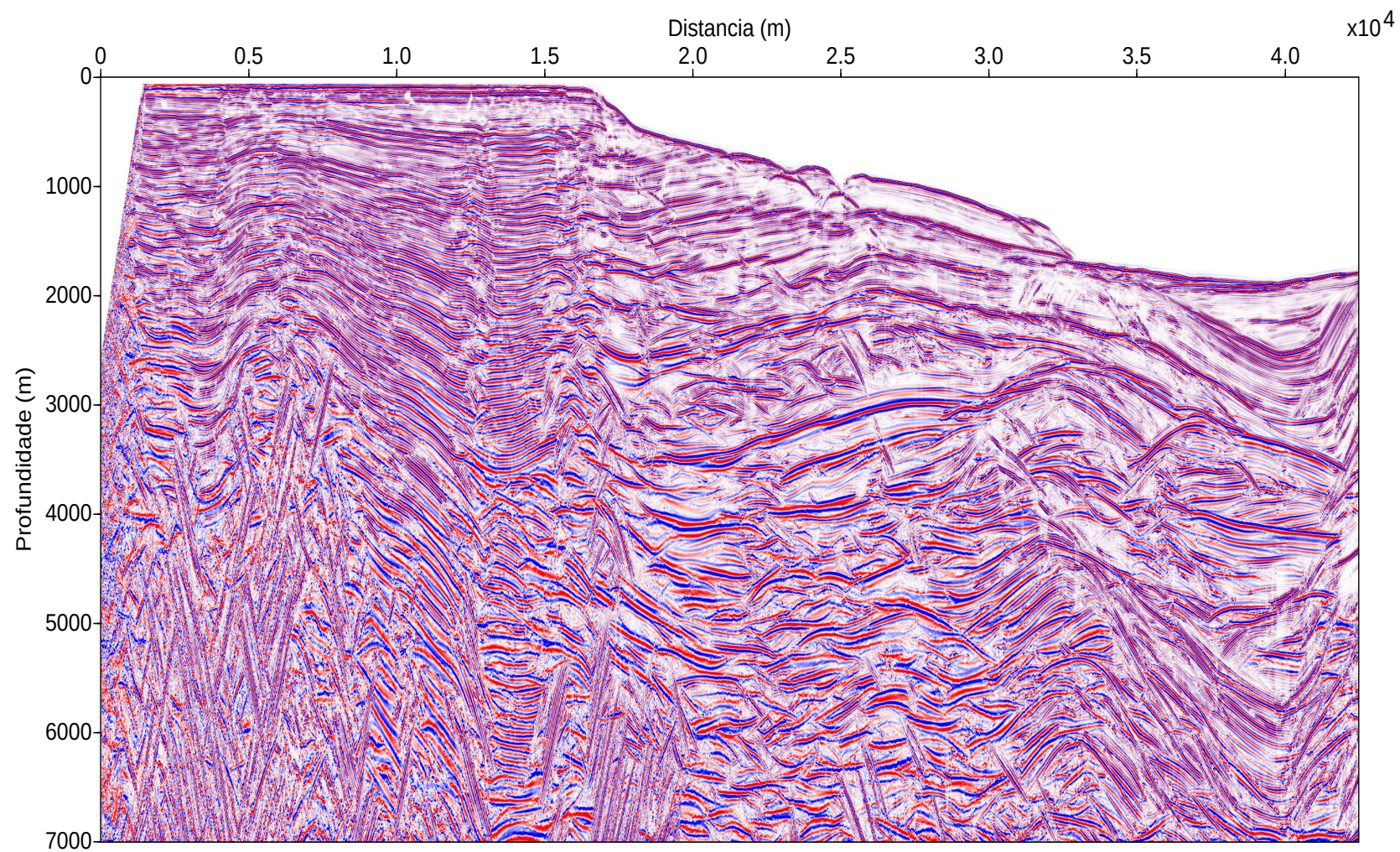


Figura 7.40: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso parcial das difrações (comparar com a Figura 7.39), porém ainda se observa a presença desses eventos indesejados (comparar com a Figura 7.36). O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 100m.

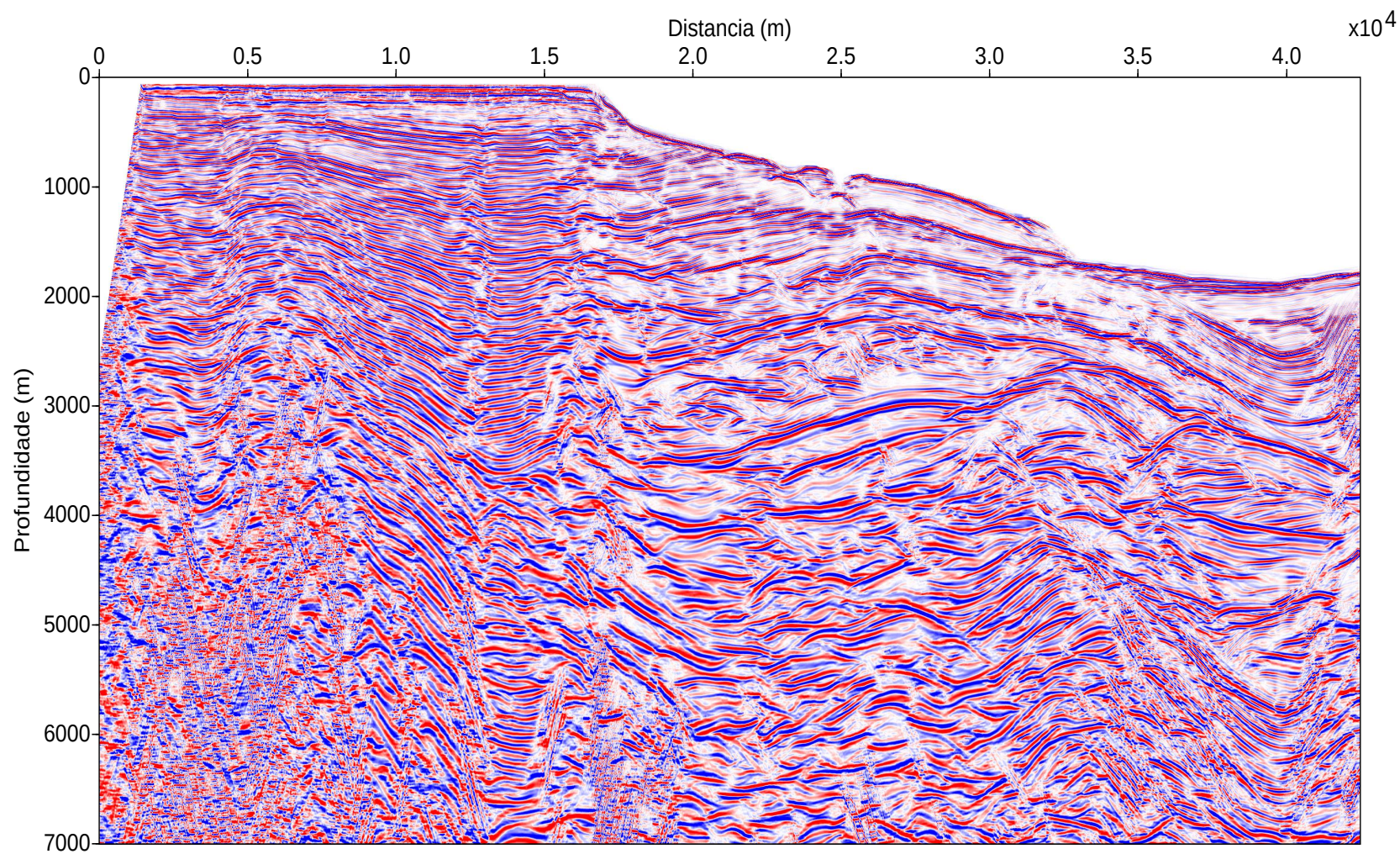


Figura 7.41: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento na profundidade da linha L2140266 do Jequitinhonha, onde se observa o colapso das difrações (comparar com a Figura 7.39), contudo surgem inúmeros arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”) nas regiões mais profundas (comparar com a Figura 7.36). O parâmetro de abertura lateral da migração utilizado foi de 600m.

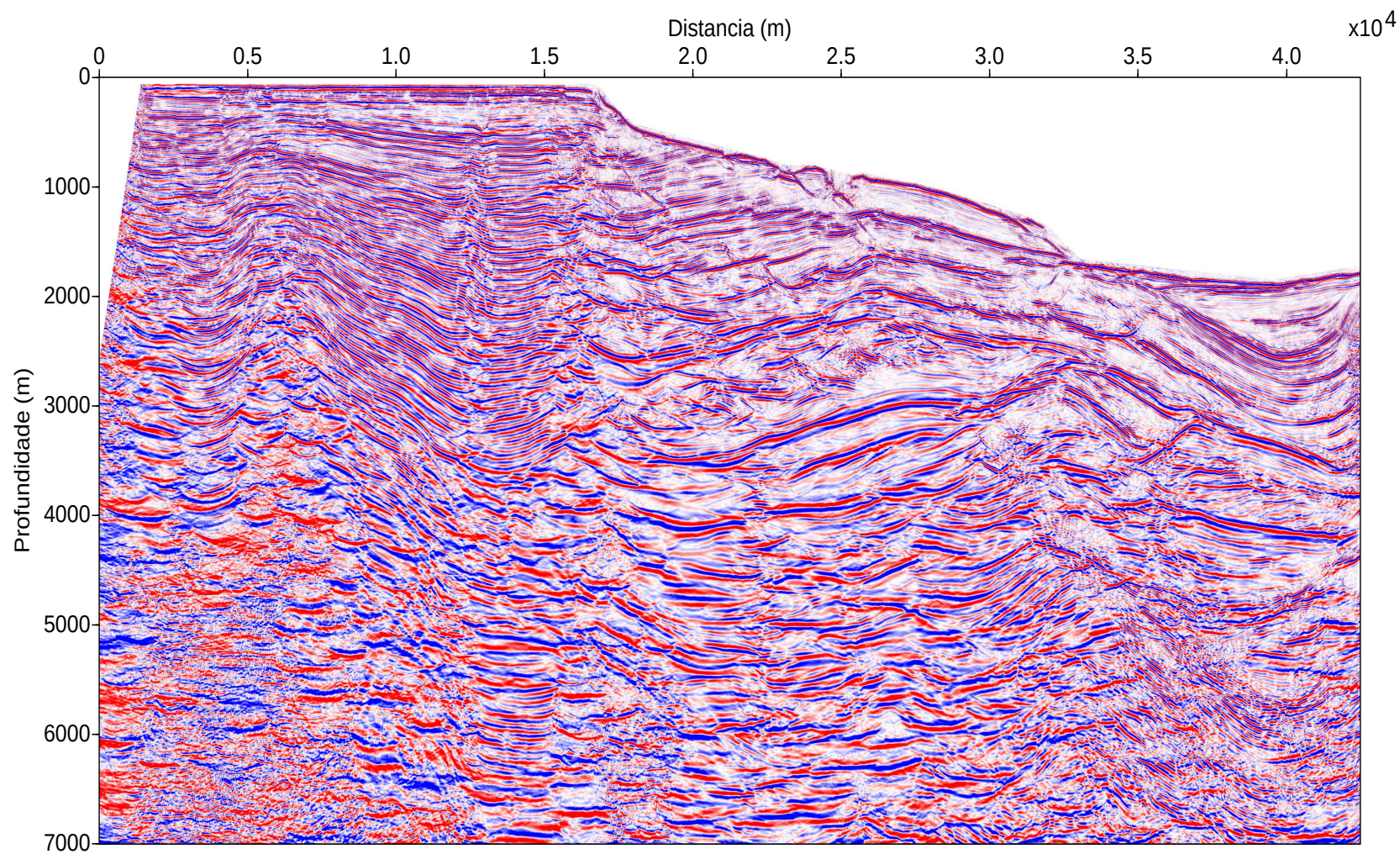
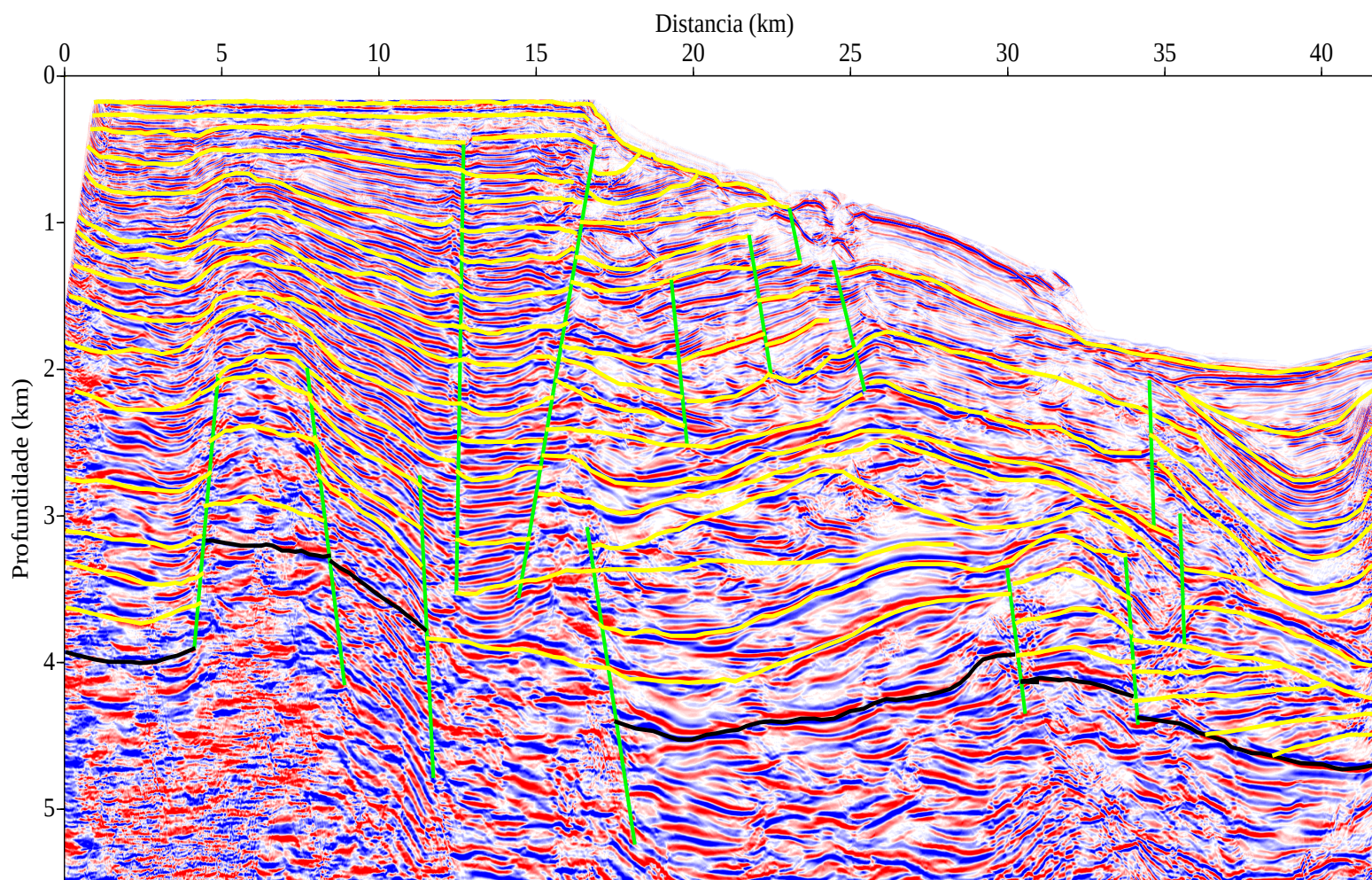


Figura 7.42: Seção migrada Kirchhoff pós-empilhamento 2D na profundidade da Figura 7.36, linha L2140266 do Jequitinhonha, com as linhas de interpretação, onde os principais eventos de reflexão e as discontinuidades estão mostrados em linhas amarelas, as anticlinais e falhas geológicas em linhas verdes e o contato dos sedimentos/embasamentos em linhas pretas. Pode-se ver que a característica mais proeminente de difração no lado esquerdo foi colapsada, e o aparecimento de alguns eventos de reflexão. Ressaltar que a seção foi limitada a 5.5km de profundidade.



8 CONCLUSÕES

A estratégia do trabalho foi a de estudar um modelo complexo e clássico, o Marmousi, para servir de base e experiência para processar e imagear o dado real relacionado a uma geologia complexa, o Jequitinhonha.

As conclusões sobre os resultados, relativos ao Marmousi e a linha L2140266 da Bacia do Jequitinhonha sobre os empilhamentos NMO e CRS, a inversão niptomográfica e a migração, são claramente mostrando dificuldades e limitações sérias, bem como casos que merecem mais atenção quanto a implementação das teorias estudadas, e servem de referência para trabalhos futuros.

As análises de velocidade no tempo para o Marmousi e o Jequitinhonha resultaram em modelos aplicados no empilhamento NMO (Figuras 6.10 e 7.9) e na migração (Figuras 6.12 e 7.10) que foram consistentes com as descrições das estruturas geológicas, uma vez que as seções mostram refletores bem contínuos, com poucos artefatos, com as difrações colapsadas, e sem submigração (caso de velocidade de migração subdimensionada), nem sobremigração (caso de velocidade de migração subdimensionada).

Os modelos de velocidade em profundidade para o Marmousi e o Jequitinhonha (Figuras 6.8 e 7.7) foram obtidos através da conversão das velocidades $v_{\text{RMS}}(t)$ para $v_{\text{INT}}(z)$ usando o programa *velconv* do CWP/SU. Este procedimento resultou nas migrações Kichhoff na profundidade (programa *sukdmig2d*) (Figuras 6.15 e 7.12) que mostra seções com aparência melhor do que as migrações no tempo; isto é medido pela continuidade dos refletores. As melhoras foram alcançadas pelo controle das aberturas dos operadores de migração.

O mapa de velocidade no tempo obtido para o Marmousi (Figura 6.6) foi comparado com o original de referência (Figura 6.2) e com o suavizado (Figura 6.4), e todos eles foram aplicados nas seções sísmicas para se obter os empilhamentos e migrações, que mostraram resultados semelhantes evidenciando a coerência da metodologia.

No entanto, observa-se que há um ganho de baixa frequência nas migrações no tempo e na profundidade. Além disso, comparando no Marmousi as seções obtidas (Figura 6.6, 6.8, 6.12 e 6.15) com as informações originais (modelo de velocidade e respectivas migrações) (Figura 6.4, 6.5, 6.11 e 6.14), se observa a necessidade de evoluir na direção de melhorar o empilhamento NMO e as migrações.

Nas seções temporais do CRS, para o Marmousi e o Jequitinhonha, se destacam o empilhamento otimizado (Figura 6.17 e 7.14) e a migração (6.12 e 7.15). Para o Jequitinhonha foram aplicadas a Correção Estática Residual e a Densificação de tracos no pré-empilhamento, objetivando a melhora da relação sinal/ruído e a resolução.

Comparando com os resultados do empilhamento para o Marmousi e o Jequitinhonha (Figura 6.10 e 7.9), se observa que a seção CRS otimizada melhora consideravelmente a continuidade dos eventos refletores em relação à NMO, além do que para grandes profundidades os eventos se tornam mais visíveis.

Na migração CRS (Figuras 6.18 e 7.15) se observa que as difrações foram colapsadas, e que não há arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), se obtendo dessa forma um resultado mais expressivo dos refletores. Um dos problemas é a granulação que aparece resultante do mapeamento. A razão pode estar relacionada à baixa relação sinal/ruído, e pode ser analisada em relação à suavização dos atributos antes das etapas de empilhamento, migração, correção residual estática e densificação dos traços.

Às seções empilhadas CRS otimizada do Marmousi e do Jequitinhonha (Figuras 6.17 e 7.14) foram aplicados os modelo de velocidade obtidos através da análise do mapa semblance no domínio do tempo (Figuras 6.6 e 7.5) e se obteve as seções migradas Kirchhoff pós-empilhamento 2D em tempo (Figuras 6.19 e 7.16). Para o Marmousi se observa o colapso das difrações e poucos arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), principalmente para eventos em grandes profundidades e a redução da granulação em relação a Figura 6.18. Para o Jequitinhonha se tem muitas difrações e arcos acima dos pontos difratores (“sorrisos”), principalmente para eventos em grandes profundidades, demonstrando a baixa qualidade da seção e a necessidade de se evoluir em busca de um melhor resultado (Comparar com a Figura 7.15).

A seção coerência mostra os eventos dominantes associados aos maiores valores de coerência, e para o Marmousi e Jequitinhonha (Figuras 6.20 e 7.17) possui máximos ao redor de 0.9 e 0.5, respectivamente.

As seções ângulo de emergência (Figuras 6.21 e 7.18) e R_N (Figuras 6.22 e 7.19) mostram claramente a separação entre as zonas de difração e de reflexão, e ambas estão diretamente relacionadas à mergulhos e curvaturas de eventos.

A seção ângulo de emergência apresenta difrações como forte característica, e o Jequitinhonha mostra uma nítida definição para o fundo oceânico. A seção R_{NIP} (Figuras 6.23 e 7.20) mostra a estratificação da distribuição, e ruidosa para os grandes valores do tempo de

trânsito. Para o Jequitinhonha há grande definição dos eventos de difração e das definições de contornos na zona rasa da seção.

O modelo de velocidade niptomográfico suavizado obtido para o Marmousi (Figura 6.28) foi comparado com o original de referência (Figura 6.2), e com seu respectivo modelo suavizado na profundidade (Figura 6.5), onde se mostra a consistência entre os modelos e um forte contraste de velocidade lateral. O mapa de velocidade niptomográfico da Figura 6.28 teve seus limites horizontais e verticais reajustados (Figura 6.37) e sua aplicação na migração Kirchhoff na profundidade (Figura 6.41) forneceu um resultado com boa continuidade nos eventos refletos, recuperação de eventos na parte central e colapso das difrações. A coerência da metodologia foi confirmada com a comparação desta migração com a da seção mostrada na Figura 6.43, obtida a partir do modelo de velocidade de referência reajustado em seus limites (Figura 6.39).

O modelo de velocidade niptomográfico suavizado obtido para o Jequitinhonha (Figura 7.25) é consistente com o obtido através da análise no mapa semblance (Figura 6.6), sendo mais na parte rasa do que na profunda. A abertura escolhida para apresentar a migração Kirchhoff na profundidade foi a de $300m$, e gerou uma seção com boa continuidade dos eventos refletos e colapso das difrações. Foram realizados vários testes usando diferentes valores para o parâmetro de abertura ($12.5m$, $100m$, $600m$) para verificar o efeito na migração.

Uma contribuição muito interessante foi a aplicação do modelo de velocidade semblance em profundidade na metodologia de inversão niptomográfica como vínculo adicional de entrada para a informação da velocidade a priori, usando o parâmetro opcional *vinput* do programa *niptomo*, no lugar dos parâmetros v_0 e $grad_0$. Para o Marmousi e o Jequitinhonha, os modelos de velocidades niptomográficos obtidos (Figuras 6.35 e 7.32), após a execução de 6 e 12 iterações inversas não-lineares, respectivamente, utilizando os modelos de velocidades semblance em profundidade (Figuras 6.8 e 7.7) reamostrados (Figuras 6.33 e 7.30), possuem grande consistência com os modelos niptomográficos das Figuras 6.28 e 7.25, uma vez que os maiores valores de velocidade estão distribuídos nas janelas mais profundas das seções e existem evidências de fortes contrastes de velocidade vertical e horizontal. Estes resultados confirmam a coerência da metodologia aplicada.

A partir dos modelos de velocidade semblance (Figuras 6.40 e 7.35), niptomográfico (Figuras 6.37 e 7.33), e niptomográfico utilizando o modelo semblance como vínculo adicional de entrada (Figuras 6.38, 7.34), do Marmousi e do Jequitinhonha, reajustados em seus limites das malhas, foi realizada a migração Kirchhoff na profundidade utilizando as seções empilhadas CRS otimizadas (Figuras 6.17 e 7.14). Para o Marmousi e o Jequitinhonha, os

resultados das migrações mostrados nas Figuras 6.42, 6.44, 7.37 e 7.38, apesar de bastante coerentes com as seções das Figuras 6.41 e 7.36, não foram satisfatórios devido possuírem muitas regiões de baixa frequência, tornando a qualidade visual das seções muito limitadas.

Comparando os processos aplicados ao Marmousi e ao Jequitinhonha, se observa claramente que a análise de velocidade no Marmousi é bem mais simples do que no Jequitinhonha.

A minha aplicação da niptomografia no Marmousi foi mais complicada do que ao Jequitinhonha devido à escolha dos parâmetros de controle, entendido que o modelo é complexo e foge à simplicidade imposta pelo modelo e atributos CRS. A aplicação da inversão no Jequitinhonha teve como maior dificuldade a escolha adequada para os parâmetros de regularização, e do número de nós da malha.

Como sugestões para trabalhos futuros, se propõe a aplicação de outras técnicas de migração pós-empilhamento na profundidade baseadas na equação da onda acústica, como as metodologias **PSPI** (*Phase-Shift Plus Interpolation*), **SS** (*Split-Step*), **RTM** (*Reverse Time Migration*), e **FFD** (*Fourier Finite Difference*), para efeito de comparação com a migração Kirchhoff, e a generalização dos resultados obtidos com as técnicas CRS e da tomografia da onda NIP para o caso 3D.

REFERÊNCIAS

- BAYKULOV, M.; GAJEWSKI, D. Prestack seismic data enhancement with crs parameters. *WIT*, n. 11, p. 50–61, 2007.
- BEYLKIN, G. Imaging of discontinuities in the inverse scattering problem by inversion of a generalized radon transformed. *Journal Mathematical Physics*, v. 26, p. 99–108, 1985.
- BEYLKIN, G. Reconstructing discontinuities in multidimensional inverse scattering problems. *Applied Optics*, v. 24, p. 4086–4088, 1985.
- BILOTI, R. *Tempos de trânsito multiparamétricos: estimação e inversão*. Tese (Doutorado) — Unicamp, Campinas, Dezembro 2001.
- BLEISTEIN, N. *Mathematical methods for wave phenomena*. New York: Academic Press Inc., 1984.
- BOOR, C. de. *A practical guide to splines*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1978.
- CAMERON, M. K.; FOMEL, S. B.; SETHIAN, J. A. Seismic velocity estimation from time migration. *IOP Publishing*, v. 23, p. 1329–1369, 2007.
- ČERVENÝ, V. *Seismic ray theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- CLAERBOUT, J. F. *Fundamentals of geophysical data processing*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1976.
- CLAERBOUT, J. F. *Imaging the Earth's Interior*. [S.l.]: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- COHEN, J. K.; STOCKWELL, J. J. W. *CWP/SU: Seismic Unix Release 39 - a free package for seismic research and processing*. 1. ed. Colorado School of Mines: Center for Wave Phenomena, 2005.
- DELPRAT-JANNAUD, F.; LAILLY, P. Ill-posed and well-posed formulations of the reflection travel time tomography problem. *Geophys. Res.*, v. 98, n. B4, p. 6589–6605, 1993.
- DUARTE, O. *Dicionário enciclopédico Inglês-Português*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003.
- DURBAUM, H. Zur bestimmung von wellen-schwindigkeiten reflexionxseismichen messungen. *Geophysical Prospecting*, v. 2, p. 151–167, 1954.
- DUVENECK, E. Tomographic velocity model inversion with crs attributes. Geophysical Institute, Germany, p. 1–50, December 2002.

- DUVENECK, E. 3d tomographic velocity model estimation with crs attributes. *Annual WIT*, p. 116–127, 2003.
- DUVENECK, E. *Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, December 2004.
- FARRA, V.; MADARIAGA, R. Seismic waveform modeling in heterogeneous media by ray perturbation theory. *J. Geophys. Res.*, B3, n. 92, p. 2697–2712, 1987.
- GAMBOA, F. *Aplicações do método de Superfície Comum de Reflexão (CRS) ao processamento sísmico*. Tese (Doutorado) — Unicamp, Campinas, Julho 2007.
- GILL, P. E.; WRIGHT, M. H. *Practical Optimization*. [S.l.]: Academic Press, 1981.
- GUTENBERG, B. The amplitudes of waves to be expected in seismic prospecting. *Geophysics*, v. 1, p. 252–256, June 1936.
- HEILMANN, B. Z. *CRS-stack-based seismic reflection imaging for land data in time and depth domains*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, February 2007.
- HERTWECK, T. *Practical aspects of the unified approach to seismic imaging*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, April 2000.
- HERTWECK, T.; SCHLEICHER, J.; MANN, J. Data stacking beyond cmp. *The Leading Edge*, p. 818–827, July 2007.
- HILTERMAN, F. J. Interpretative lessons form three-dimensional modeling. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 47, n. 05, p. 784–808, 1982.
- HUBRAL, P.; KREY, T. *Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1980.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. Determination of fresnel zones from travelttime measurements. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 58, n. 5, p. 703–712, 1993.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. Geometrical-spreading and ray-caustic decomposition of elementary seismic waves. *Geophysics*, v. 60, n. 4, p. 1195–1202, 1995.
- HUBRAL, P.; SCHLEICHER, J.; TYGEL, M. A unified approach to 3-d seismic reflection imaging: Part ii: Theory. *Geophysics*, v. 61, n. 3, p. 759–775, 1996.
- JÄGER, R. *The common-reflection-surface stack: Theory and application*. Dissertação (Mestrado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, 1999.
- JANNANE, M.; XIE, M. Wavelengths of earth structures that can be resolved from seismic reflection data. *Geophysics*, n. 54, p. 906–910, 7 1989.
- KOGLIN, I. *Estimation of residual static time shifts by means of the CRS-based residual static correction approach*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, Jun. 2005.

- LEITE, L. W. B. *Introdução a Análise Espectral em Geofísica*. Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará, 1998.
- LIMA, H. M. *Processamento e imageamento de dados sísmicos marinhos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2010.
- LINDSEY, J. P. The fresnel zone and its interpretative significance. *The Leading Edge*, v. 8, n. 10, p. 33–39, 1989.
- MAGNAVITA, L. P. et al. Salt tectonics control on the distribution of drift sedimentary facies in the jequitinhonha basin. *American association of petroleum geologist*, Tulsa, OK, p. 878–879, 1998.
- MANN, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips. *63th Mtg. EAGE*, 2001.
- MANN, J. Common-reflection-surface stack and conflicting dips. *71st Annual Internat. Mtg. SEG*, 2001.
- MANN, J. *Extensions and applications of the common reflection surface stack method*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, July 2002.
- MANN, J. et al. Macro-model independent approximative prestack time migration. *62 Mtg. EAGE Extended Abstracts*, 2000.
- MANN, J.; SCHLEICHER, J.; HERTWECK. Data stacking beyond cmp. *Geophysics*, 2006.
- MENKE, W. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. [S.l.]: Academic Press, 1984.
- MÜLLER, T. *The common reflection surface stack method-seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model*. Tese (Doutorado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, July 1999.
- NEIDELL, N. S.; TANER, M. T. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, v. 36, n. 03, p. 482–497, 1971.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, n. 7, p. 308–313, 1965.
- NEWMAN, P. Divergence effects in a layered earth. *Geophysics.*, v. 38, n. 3, p. 481–488, 1973.
- OEVEL, W. *Einführung in die numerische Mathematik*. Amsterdam: Spektrum Akademischer Verlag, 1996.
- PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. Algorithm 583 lsqr: Sparse linear equations and least squares problems. *ACM Trans. Math. Softw.*, v. 8, n. 2, p. 195–209, 1982.
- PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. Lsqr: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Trans. Math. Softw.*, v. 8, n. 1, p. 43–71, 1982.

- POPOV, M. M. *Ray theory and gaussian beam method for geophysicists*. Salvador: EDUFBA, 1996.
- SCHLEICHER, J. et al. Modeling, migration, and demigration. *submitted to the Leading edge*, Unicamp, 1998.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 3-d true-amplitude finite-offset migration. *Geophysics*, Unicamp, v. 58, n. 8, p. 1112–1126, 1993.
- SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*, Unicamp, v. 41, p. 495–513, 1993.
- SCHLEICHER, J. et al. Minimum apertures and fresnel zones in migration and demigration. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 62, n. 1, p. 183–194, 1997.
- SCHNEIDER, W. A. Integral formulation for migration in two-dimensions and three-dimensions. *Geophysics*, v. 43, n. 01, p. 49–76, 1978.
- SEN, M.; STOFFA, P. L. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Amsterdam: Elsevier, 1995.
- SGUAZZERO, P.; VESNAVER, A. *A Comparative Analysis of Algorithms for Stacking Velocity Estimation: Deconvolution and Inversion*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1987.
- SHAH, P. M. Use of wavefront curvature to relate seismic data with subsurface parameters. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 38, n. 5, p. 812–825, Oct. 1973.
- SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration seismology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration seismology: history, theory and data acquisition*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- SHERIFF, T. Factors affecting seismic amplitudes. *Geophysical Prospecting*, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 125–138, 1975.
- SOLEIMANI, M. et al. Solving the problem of conflicting dips in common-reflection-surface stack: Extended abstracts. *1st Internat. Conf. & Exhib*, Shiraz, Iran, 2009.
- STEHT, M. von. *The common-reflection-surface stack under considerations of the acquisition surface topography*: Combined approach and data examples. Dissertação (Mestrado) — Karlsruhe University, Karlsruhe, 2004.
- TOLDI, L. T. Velocity analysis without picking. *Geophysics*, v. 54, n. 2, p. 191–199, February 1989.
- VERSTEEG, R. J.; GRAU, G. *The marmousi experience*. IFP, France: EAGE, 1991.
- YILMAZ, O. *Seismic data processing*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1987.

APÊNDICE

APÊNDICE A – REGULARIZAÇÃO DA MATRIZ TOMOGRÁFICA

Neste apêndice são discutidos os fatores de regularização ε_{xx} e ε_{zz} aplicados à metodologia de inversão niptomográfica, na forma de vínculos adicionais, mostrados na seção 5.3. Se objetiva discutir com mais detalhes a importância destes vínculos para a evolução da função objeto de minimização, bem como para o modelo de velocidade final.

Problema em 2D

A matriz envolvida no cálculo de um vetor atualizado do modelo $\Delta \mathbf{m}$ do vetor desajuste do dado $\Delta \mathbf{d}(\mathbf{m})$, conforme discutido na seção 5.1, é usualmente singular ou próxima, sendo que as correspondentes equações não contém informação suficiente para determinar especificamente todos os parâmetros do modelo. Para assegurar uma solução estável do problema inverso, são introduzidos vínculos adicionais sobre os parâmetros do modelo. Uma maneira de fazer isto é requerer que o modelo de velocidade tenha curvatura mínima, isto é, derivadas de segunda ordem mínimas. Visando solucionar o problema inverso de forma independente do espaçamento intervalar de nós B-spline usado na descrição do modelo de velocidade, a condição de curvatura mínima é imposta sobre sua distribuição de velocidade suavizada, não sobre os parâmetro do modelo (DELPAT-JANNAUD; LAILLY, 1993). Como uma medida da curvatura global do modelo de velocidade, usa-se aqui a integral do quadrado de sua segunda derivada sobre o domínio espacial inteiro considerado durante a inversão.

Uma integral bidimensional sobre a soma do peso da velocidade quadrada e a derivada de segunda ordem quadrada da velocidade será usada como uma medida da curvatura do modelo de velocidade. Esta medida pode ser escrita como uma soma de três integrais (derivadas mescladas não são consideradas), a qual pode novamente ser expressa em termos dos parâmetros do modelo de velocidade. A integral sobre a segunda derivada quadrada da velocidade, relativa à coordenada x , lê:

$$\int_z \int_x \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx dz = \int_z \int_x \left[\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_z} v_{ij} \frac{\partial^2 \beta_i(x)}{\partial x^2} \beta_j(-z) \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_z} v_{kl} \frac{\partial^2 \beta_k(x)}{\partial x^2} \beta_l(-z) \right] dx dz$$

$$\int_z \int_x \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx dz = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_z} \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_z} v_{ij} v_{kl} \int_x \frac{\partial^2 \beta_i(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \beta_k(x)}{\partial x^2} dx \int_z \beta_j(-z) \beta_l(-z) dz \quad (\text{A.1})$$

$$\int_z \int_x \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx dz = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_z} \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_z} v_{ij} v_{kl} \tilde{D}_{ik}^{xx} \hat{D}_{jl}$$

com

$$\tilde{D}_{ik}^{xx} = \int_x \frac{\partial^2 \beta_i(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \beta_k(x)}{\partial x^2} dx. \quad (\text{A.2})$$

Além disso, $\hat{D}_{jl}$ é definido no caso unidimensional e usado aqui como:

$$\hat{D}_{jl}^{zz} = \int_z \frac{\partial^2 \beta_j(-z)}{\partial z^2} \frac{\partial^2 \beta_l(-z)}{\partial z^2} dz \quad \text{e} \quad \hat{D}_{ij} = \int_z \beta_j(-z) \beta_l(-z) dz. \quad (\text{A.3})$$

Se os coeficientes B-splines v_{ij} são arranjados em um vetor coluna $\mathbf{m}^{(v)}$ e matrizes $\tilde{\mathbf{D}}^{xx}$ e $\hat{\mathbf{D}}$ são combinadas em uma matriz $\mathbf{D}^{xx}$ $(n_x n_z) \times (n_x n_z)$, por definição vem que:

$$m_{[(i-1)n_z+j]}^{(v)} := v_{ij} \quad \text{e} \quad D_{[(i-1)n_z+j]}^{(xx)} := \tilde{D}_{ik}^{xx} \hat{D}_{jl}, \quad (\text{A.4})$$

a equação (A.1) pode ser reescrita em uma forma simplificada:

$$\int_z \int_x \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx dz = \sum_{p=1}^{(n_x n_z)} \sum_{q=1}^{(n_x n_z)} m_p^{(v)} m_q^{(v)} D_{pq}^{xx} = \mathbf{m}^{(v)T} \mathbf{D}^{xx} \mathbf{m}^{(v)}. \quad (\text{A.5})$$

Por definição adicional das matrizes $\tilde{\mathbf{D}}$ e $\hat{\mathbf{D}}^{zz}$ com

$$\tilde{D}_{ik} = \int_x \beta_i(x) \beta_k(x) dx \quad \text{e} \quad \hat{D}_{jl}^{zz} = \int_z \frac{\partial^2 \beta_j(-z)}{\partial z^2} \frac{\partial^2 \beta_l(-z)}{\partial z^2} dz \quad (\text{A.6})$$

e combinando-as com a matriz $\hat{\mathbf{D}}$ para produzir as matrizes $\mathbf{D}^{zz}$ e $\mathbf{D}$ $(n_x n_z) \times (n_x n_z)$ com

$$D_{[(i-1)n_z+j],[(k-1)n_z+l]}^{zz} = \tilde{D}_{ik} \hat{D}_{jl}^{zz} \quad \text{e} \quad D_{[(i-1)n_z+j],[(k-1)n_z+l]} = \tilde{D}_{ik} \hat{D}_{jl}. \quad (\text{A.7})$$

A medida global de curvatura do modelo de velocidade 2D pode ser escrita em termos do vetor modelo de velocidade $\mathbf{m}^{(v)}$ na forma:

$$\int_z \int_x \left[\epsilon_{xx} \left(\frac{\partial^2 v(x, z)}{\partial x^2} \right)^2 + \epsilon_{zz} \left(\frac{\partial^2 v(x, z)}{\partial z^2} \right)^2 + \epsilon v^2(x, z) \right] dx dz = \mathbf{m}^{(v)T} \mathbf{D}^{2D} \mathbf{m}^{(v)} \quad (\text{A.8})$$

Aqui, $\mathbf{D}^{2D} = \epsilon_{xx} \mathbf{D}^{xx} + \epsilon_{zz} \mathbf{D}^{zz} + \epsilon \mathbf{D}$, onde, novamente, $\epsilon_{xx} > 0$, $\epsilon_{zz} > 0$ e $\epsilon \geq 0$ são fatores de peso e normalização. É importante ressaltar que ϵ deve ser escolhido muito menor que ϵ_{xx}

e ϵ_{zz} , mas não zero.

Regularização variável Espacialmente

Os fatores ϵ_{xx} , ϵ_{zz} e ϵ podem ser definidos como funções espacialmente variáveis com uma dependência sobre uma ou mais coordenadas espaciais. Isto pode ser proveitoso, se é conhecido de antemão, que partes do modelo de velocidade estarão sobvinculadas pelos dados, ao passo que em outras partes existe informação suficiente para se obter um detalhado modelo de velocidade. O peso da regularização global ϵ'' na função objeto de minimização (5.13) pode então ter um valor baixo, enquanto os pesos das variáveis espaciais ϵ_{xx} , ϵ_{zz} asseguram vínculos suficientes para todas as partes do modelo.

Uma forma de descrever a dependência espacial dos fatores peso é usar novamente B-splines, definida sobre a mesma malha de localizações de nós como usado para a descrição do modelo de velocidade em si. Uma função peso 2D espacialmente variável $\epsilon_{xx}(x, z)$ pode, por exemplo, ser definida como:

$$\epsilon_{xx}(x, z) = \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{nz} \epsilon_{ij}^{xx} \beta_i(x) \beta_j(-z), \quad (\text{A.9})$$

onde os coeficientes ϵ_{ij}^{xx} podem ser escolhidos baseados em um conhecimento à priori de onde o modelo está bem vinculado pelo dado. Oevel (1996) afirma que escolher $\epsilon_{ij}^{xx} = 1$ para todos os valores de i e j equivale a usar um fator peso constante $\epsilon_{xx} = 1$.

Introduzindo uma função peso espacialmente variável $\epsilon_{xx}(x, z)$, como na equação (A.9), conduz à uma redefinição da matriz $\mathbf{D}''^{2D}$.

APÊNDICE B – DERIVADAS DE FRÉCHET

Neste apêndice, as derivadas de Fréchet para a inversão niptomográfica 2D, isto é, as derivadas das quantidades modeladas $(\tau_0, M_{\text{NIP}}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)_i$ com relação aos parâmetros do modelo NIP $(x, z, \theta)_i^{(\text{NIP})}$ e a velocidade dos parâmetros do modelo v_{jk} , definidos na seção 5.1, são derivadas. Como o modelo direto no caso 2D é realizado com o traçamento dinâmico do raio em coordenadas centradas no raio (Seção 5.1), a teoria da perturbação do raio também é aplicada nestas coordenadas.

As derivadas de Fréchet e a inversão niptomográfica relacionam-se através do cálculo preditivo representado por:

$$\mathbf{F} = \frac{\partial(\tau, M, \alpha, \xi)}{\partial(x, z, \theta, v)}, \quad (\text{B.1})$$

obtidas pela teoria da perturbação do raio executada pelo uso das coordenadas centradas no raio para o caso 2D, onde esta teoria é aplicada nas coordenadas q e s (s é o comprimento de arco ao longo do raio e q a coordenada normal à direção do raio) (FARRA; MADARIAGA, 1987). Os resultados são transformados em coordenadas cartesianas e ângulos nos pontos inicial e final do raio.

Perturbações na coordenada q e a correspondente vagarosidade p na posição s_1 ao longo do raio, podem ser relacionadas às perturbações Δq e Δp em s_0 , e as da velocidade Δv , organizados na forma:

$$\begin{pmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta p_1 \end{pmatrix} = \mathbf{\Pi}(s_1, s_0) \begin{pmatrix} \Delta q_0 \\ \Delta p_0 \end{pmatrix} + \int_{s_0}^{s_1} \mathbf{\Pi}(s_1, s) \Delta \mathbf{B}(\Delta v, s) ds, \quad (\text{B.2})$$

onde $\Delta \mathbf{B} = [0, (v_q \Delta v / v^3 - \Delta v_q / v^2)]^T$. O índice q denota a derivada parcial relativa a q , $\Delta q_1 := \Delta q(s_1)$, e:

$$\mathbf{\Pi}(s_1, s_0) = \begin{pmatrix} Q_1 & Q_2 \\ P_1 & P_2 \end{pmatrix} \quad (\text{B.3})$$

é a matriz propagadora do raio entre os pontos s_0 e s_1 , onde os elementos são soluções do sistema de traçamento do raio com condições iniciais para as ondas planas (Q_1, P_1) e fonte pontual (Q_2, P_2) normalizada, respectivamente, e dados por:

$$\frac{d}{ds} \mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} 0 & v \\ -\frac{1}{v^2} v_{qq} & 0 \end{pmatrix} \mathbf{\Pi}. \quad (\text{B.4})$$

Devido à propriedade $\mathbf{\Pi}(s_1, s) = \mathbf{\Pi}(s_1, s_0)\mathbf{\Pi}(s, s_0)$, a equação (B.2) pode ser validada durante o traçamento de raio. O valor desejado $M = P_2/Q_2$, do qual ΔM depende diretamente da perturbação dos elementos de $\mathbf{\Pi}$ toma a forma:

$$\Delta M = \frac{\Delta P_2}{Q_2} - \frac{P_2}{Q_2^2} \Delta Q_2. \quad (\text{B.5})$$

Podemos relacionar estas perturbações linearmente às perturbações Δq , Δp e Δv ao longo do raio na forma:

$$\Delta \mathbf{\Pi}(s_0, s_1) = \begin{pmatrix} \Delta Q_1 & \Delta Q_2 \\ \Delta P_1 & \Delta P_2 \end{pmatrix} \quad (\text{B.6})$$

Com o objetivo de separar a perturbação na velocidade das coordenadas espaciais, o argumento $\Delta \mathbf{S}$ pode ser escrito na forma $\Delta \mathbf{S} = \Delta \mathbf{S}_1(\Delta v) + \Delta \mathbf{S}_2(\Delta q, \Delta p)$. O cálculo das coordenadas centradas no raio para $\Delta \mathbf{S}_1$ e $\Delta \mathbf{S}_2$ toma a forma:

$$\Delta \mathbf{S}_1(\Delta v) = \begin{pmatrix} 0 & \Delta v \\ \frac{2}{v^3} (v_{qq}\Delta v + v_q\Delta v_q - \frac{\Delta v}{v}v_q^2 - \frac{v}{2}\Delta v_{qq}) & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.7})$$

e

$$\Delta \mathbf{S}_2(\Delta v) = \begin{pmatrix} 2v_q\Delta p & 2v_q\Delta q \\ (\frac{3}{v^3}v_qv_{qq} - \frac{1}{v^2}v_{qqq})\Delta q & -2v_q\Delta p \end{pmatrix}, \quad (\text{B.8})$$

onde Δq e Δp relacionam-se em Δq_0 e Δp_0 através da equação (B.6) da matriz propagadora do raio. A derivada espacial de terceira ordem da velocidade está presente na equação (B.8).

A quantidade $\Delta \mathbf{\Pi}(\Delta s_0)$ é calculada pelo sistema de traçamento dinâmico do raio:

$$\Delta \mathbf{\Pi}(\Delta s_0) = \mathbf{\Pi} \begin{pmatrix} 0 & -v\Delta s_0 \\ \frac{v_{qq}}{v^2}\Delta s_0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{B.9})$$

As relações abaixo se originaram de algumas considerações geométricas:

$$\begin{aligned} \Delta q_0 &= \cos \theta \Delta x - \sin \theta \Delta z \\ \Delta p_0 &= \frac{\sin(\Delta \theta)}{v(s_0)} \approx \frac{\Delta \theta}{v(s_0)} \\ \Delta s_0 &= \sin \theta \Delta x + \cos \theta \Delta z \\ \Delta \xi &= \frac{\Delta q_1}{\cos \alpha} \\ \Delta \alpha &\approx \sin(\Delta \alpha) = v(s_1)\Delta p_1. \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

Usando os resultados expressos nas equações (B.2) à (B.10), os valores $\frac{M}{q_0}$, $\frac{M}{p_0}$, $\frac{M}{s_0}$, $\frac{M}{v}$, $\frac{q_1}{v}$ e $\frac{p_1}{v}$ podem ser calculados e, com a equação (B.10), estes podem ser usados para se obter as

derivadas de Fréchet envolvendo M , α e ξ , de forma que se obtém:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M}{\partial x} &= \cos \theta \frac{\partial M}{\partial q_0} + \sin \theta \frac{\partial M}{\partial s_0} \\
\frac{\partial M}{\partial z} &= -\sin \theta \frac{\partial M}{\partial q_0} + \cos \theta \frac{\partial M}{\partial s_0} \\
\frac{\partial M}{\partial \theta} &= -\frac{\sin \theta}{\cos \alpha} Q_1 \\
\frac{\partial M}{\partial v} &= \text{Diretamente das equações (B.8-B.10)} \\
\frac{\partial \alpha}{\partial x} &= v(s_1) \cos \theta P_1 \\
\frac{\partial \alpha}{\partial z} &= -v(s_1) \sin \theta P_1 \\
\frac{\partial \alpha}{\partial \theta} &= \frac{v(s_1)}{v(s_0)} \\
\frac{\partial \xi}{\partial v} &= v(s_1) \frac{\partial p_1}{\partial v} \\
\frac{\partial \xi}{\partial x} &= \frac{\cos \theta}{\cos \alpha} Q_1 \\
\frac{\partial \xi}{\partial z} &= -\frac{\sin \theta}{\cos \alpha} Q_1 \\
\frac{\partial \xi}{\partial \theta} &= \frac{1}{v(s_0) \cos \theta} Q_2 \\
\frac{\partial \xi}{\partial v} &= \frac{1}{\cos \alpha} \frac{\partial q_1}{\partial v}.
\end{aligned} \tag{B.11}$$

As derivadas temporais de Fréchet são obtidas a partir da expressão:

$$\Delta t = \frac{\sin \theta}{v(s_0)} \Delta x - \frac{\cos \theta}{v(s_0)} \Delta z - \int_{s_0}^{s_1} \frac{\Delta v(s)}{v^2(s)} ds. \tag{B.12}$$

Para cada raio pertencente ao dado de entrada e cada nó B-spline do modelo de velocidade, tais expressões precisam ser calculadas. Para um dado nó B-spline (j, k) , a perturbação da velocidade é

$$\Delta v(x, z) = \beta_j(x) \beta_k(z). \tag{B.13}$$

As equações (B.11) podem ser expandidas para cada raio usando as equações (B.6), (B.7), (B.8) e considerando a perturbação da velocidade (B.13), além de considerar a componente da primeira derivada espacial do tempo de trânsito de segunda ordem na localização do raio normal ξ_0 , $p^{(\xi)}$, por $\Delta p^{(\xi)} = \frac{\sin(\Delta \alpha)}{v(s_0)}$, as derivadas de Fréchet podem ser definidas, a partir

agora, como (DUVENECK, 2004):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} &= \frac{\cos \theta_j}{\cos \alpha_j} Q_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial \xi_i}{\partial z_j} &= -\frac{\sin \theta_j}{\cos \alpha_j} Q_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_j} &= \frac{1}{v(s_{0j}) \cos \alpha_j} Q_2(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial \xi_i}{\partial v_{jk}} &= \frac{1}{\cos \alpha_j} \left[Q_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} + Q_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} \right], \\
\frac{\partial p_i^{(\xi)}}{\partial x_j} &= \cos \theta_j \cos \alpha_j P_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial p_i^{(\xi)}}{\partial z_j} &= -\cos \theta_j \sin \alpha_j P_1(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial p_i^{(\xi)}}{\partial \theta_j} &= \frac{\cos \alpha_j}{v(s_{0j})} P_2(s_{1j}, s_{0j}) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial p_i^{(\xi)}}{\partial v_{jk}} &= \cos \alpha_j \left[P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} + P_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} \right].
\end{aligned} \tag{B.14}$$

onde

$$\frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} = - \int_{s_{0i}}^{s_{1i}} Q_2(s, s_{0i}) \left\{ -\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] + \frac{1}{v^3} \frac{\partial v}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] \right\} ds \tag{B.15}$$

e

$$\frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} = - \int_{s_{0i}}^{s_{1i}} Q_1(s, s_{0i}) \left\{ -\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] + \frac{1}{v^3} \frac{\partial v}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] \right\} ds. \tag{B.16}$$

O índice i representa uma propriedade em relação ao i -ésimo raio, e δ_{ij} representa o símbolo

de Kronecker, ou delta de Kronecker. Para $M^{(\xi)}$, as derivadas de Fréchet são dadas por:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_i^{(\xi)}}{\partial x_j} &= -2\sin \alpha_j \cos \alpha_j \cos \theta_j v(s_{1j}) P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} + \\
&+ \cos^2 \alpha_j \left(\frac{\partial M_j}{\partial q_{0j}} \cos \theta_j + \frac{v(s_{0j}) \sin \theta_j}{Q_2^2(s_{1j}, s_{0j})} \right) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial M_i^{(\xi)}}{\partial z_j} &= 2\sin \alpha_j \cos \alpha_j \cos \theta_j v(s_{1j}) P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} + \\
&+ \cos^2 \alpha_j \left(-\frac{\partial M_j}{\partial q_{0j}} \sin \theta_j + \frac{v(s_{0j}) \cos \theta_j}{Q_2^2(s_{1j}, s_{0j})} \right) \delta_{ij}, \\
\frac{\partial M_i^{(\xi)}}{\partial \theta_j} &= -2\sin \alpha_j \cos \alpha_j \frac{v(s_{1j})}{v(s_{0j})} \frac{P_2^2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} + \frac{1}{v(s_{0j})} \frac{\partial M_j}{\partial p_{0j}} \delta_{ij}, \\
\frac{\partial M_i^{(\xi)}}{\partial v_{jk}} &= -2\sin \alpha_j \cos \alpha_j \frac{P_2(s_{1j}, s_{0j})}{Q_2(s_{1j}, s_{0j})} \left[P_1(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{q}_i}{\partial v_{jk}} + P_2(s_{1j}, s_{0j}) \frac{\partial \tilde{p}_i}{\partial v_{jk}} \right] + \frac{\partial M_j}{\partial v_{jk}}.
\end{aligned} \tag{B.17}$$

A delta de Kronecker serve para definir que cada ponto do dado corresponde à apenas um ponto do NIP considerado no modelo, e:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_i}{\partial q_{0i}} &= -\frac{1}{Q_2^2(s_{1j}, s_{0j})} \int_{s_{0i}}^{s_{1i}} \left[2 \frac{\partial v}{\partial q} \tilde{P}_{2i} (3\tilde{Q}_{2i} \tilde{P}_{1i} + 1) - \left(\frac{3}{v^3} \frac{\partial v}{\partial q} \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^3 v}{\partial q^3} \right) \tilde{Q}_{2i}^2 \tilde{P}_{1i} \right] ds, \\
\frac{\partial M_i}{\partial p_{0i}} &= -\frac{1}{Q_2^2(s_{1j}, s_{0j})} \int_{s_{0i}}^{s_{1i}} \left[6 \frac{\partial v}{\partial q} \tilde{P}_{2i}^2 \tilde{Q}_{2i} - \left(\frac{3}{v^3} \frac{\partial v}{\partial q} \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^3 v}{\partial q^3} \right) \tilde{Q}_{2i}^3 \right] ds, \\
\frac{\partial M_i}{\partial v_{jk}} &= -\frac{1}{Q_2^2(s_{1j}, s_{0j})} \int_{s_{0i}}^{s_{1j}} \left\{ \left[\tilde{P}_{2i}^2 - \tilde{Q}_{2i}^2 \frac{2}{v^3} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial q^2} - \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial q} \right)^2 \right) \right] \beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s)) + \right. \\
&+ \left. \tilde{Q}_{2i}^2 \frac{1}{v^3} \left(2 \frac{\partial v}{\partial q} \frac{\partial}{\partial q} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] - v \frac{\partial^2}{\partial q^2} [\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))] \right) \right\} ds.
\end{aligned} \tag{B.18}$$

Nestas equações, os argumentos $\tilde{Q}_{1i}$, $\tilde{Q}_{2i}$, $\tilde{P}_{1i}$ e $\tilde{P}_{2i}$ são definidos como $\tilde{Q}_{1i} = Q_1(s, s_{0i})$, $\tilde{Q}_{2i} = Q_2(s, s_{0i})$ e $\tilde{P}_{2i} = P_2(s, s_{0i})$. As derivadas de Fréchet para o tempo de trânsito τ são obtidas através da integração da equação (B.12) na forma 2D, considerando a perturbação

do tempo de trânsito relativo a perturbação do modelo de velocidade, que resulta em:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \tau_i}{\partial x_j} &= -\frac{\sin \theta_j}{v(s_{0j})} \delta_{ij}, \\
\frac{\partial \tau_i}{\partial z_j} &= -\frac{\cos \theta_j}{v(s_{0j})} \delta_{ij}, \\
\frac{\partial \tau_i}{\partial \theta_j} &= 0, \\
\frac{\partial \tau_i}{\partial v_{jk}} &= -\int_{s_{0i}}^{s_{1i}} \frac{\beta_j(x(s)) \beta_k(-z(s))}{v^2(s)} ds,
\end{aligned} \tag{B.19}$$

onde pode-se definir as derivadas de Fréchet sob a forma

$$\mathbf{F} = \frac{\partial(\tau, M, p, \xi)}{\partial(x, z, \theta, v)}. \tag{B.20}$$

O cálculo dos atributos CRS, por modelagem direta, é feito através dos sistemas de traçamentos dinâmico e cinemático do raio (DUVENECK, 2002). Usando o sistema de traçamento cinemático do raio em 2D, podemos calcular a posição emergente ξ_0 do raio normal e sua componente horizontal $p^{(\xi)}$ em ξ_0 na forma:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x_i}{\partial s} &= \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_i^{(x)}} = v p_i^{(x)}, \quad i = 1, 2; \\
\frac{\partial p_i^{(x)}}{\partial s} &= \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x_i} = -\frac{1}{v^2} \frac{\partial v}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2,
\end{aligned} \tag{B.21}$$

onde $\tilde{H}$ é definido como a função hamiltoniana, s o comprimento de arco do raio, $\frac{\partial x_i}{\partial s}$ o vetor unitário tangente a curva do raio e $\frac{\partial p_i^{(x)}}{\partial s}$ permite avaliar o vetor componente horizontal $\mathbf{p}$ ao longo de um raio contínuo em um meio de variação suavizado.

O uso da integral da equação

$$\frac{\partial \tau}{\partial s} = \sum_{i=1}^2 p_i^{(x)} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial p_i^{(x)}} = \frac{1}{v} \tag{B.22}$$

ao longo do raio fornece o tempo de trânsito ao longo deste.

O cálculo de $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ pode ser feito em diferentes sistemas de coordenadas através do traçamento dinâmico do raio. Usar-se-á as coordenadas centradas no raio, visto que apresen-

tam maior flexibilidade na obtenção de resultados. Para o caso 2D, a derivada espacial de segunda ordem do tempo de trânsito da onda NIP, no raio central, é definida por

$$M_{\text{NIP}} = \frac{P_2}{Q_2}, \quad (\text{B.23})$$

onde P_2 e Q_2 são soluções do sistema de traçamento dinâmico do raio correspondente a uma fonte pontual.

Em coordenadas cartesianas, a equação (B.23) torna-se:

$$M_{\text{NIP}} = (\cos^2 \alpha) M_{\text{NIP}} = (\cos^2 \alpha) \frac{P_2}{Q_2}, \quad (\text{B.24})$$

onde $M_{\text{NIP}}^{(\xi)}$ é dado por:

$$M_{\text{NIP}}^{(\xi)} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} K_{\text{NIP}}. \quad (\text{B.25})$$

O *método de Runge-Kutta* de 4ª ordem é utilizado como solução numérica dos dois sistemas de traçamento de raio da equação (B.21).

APÊNDICE C – HARDWARE E SOFTWARE USADOS

A metodologia de empilhamento convencional NMO e as seções migradas Kirchhoff foram executadas utilizando o pacote de processamento sísmico Seismic Un*x (Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines), versão 4.1.

Os resultados do empilhamento CRS foram obtidos usando a implementação de Mann (2002), e o algoritmo de aplicação deste método é escrito na linguagem computacional C++. Esta implementação é da Universidade de Karlsruhe (Alemanha) versão 5.1.

O programa de inversão tomográfica da onda NIP utilizado nesta dissertação foi desenvolvido por Duveneck (2004) e implementado na linguagem de programação C++. Esta implementação é da Universidade de Karlsruhe (Alemanha) versão 1.1.

O software computacional matemático MatLab R2009a e o sistema Seismic Un*x versão 4.1 foram utilizados para gerar os mapas de distribuição de velocidades dos dados sísmicos.

O pacote LaTeXDraw 2.0.5 foi utilizado para gerar algumas figuras contidas nesta dissertação.

Esta dissertação foi escrita em PCs com o sistema operacional Linux (Ubuntu 11.10) utilizando o processador de texto (distribuição livre) T_EX, o pacote L^AT_EX, e diversas extensões. A bibliografia foi gerada através do BiB_TE_X.