

Aplicação do CRS-parcial em dados esparsos para a inversão NIP-tomográfica.

Felipe A. V. Pena, Lourenildo W. B. Leite e Wildney W. S. Vieira, UFPA, Brasil.

Copyright 2014, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo a aplicação de métodos do empilhamento superfície-de-reflexão-comum (CRS) convencional, do CRS-parcial e da inversão NIP-tomográfica para gerar imagens sísmicas em dados sísmicos esparsos. Para analisar o resultado do método aplicado, foram realizados testes com dados sintéticos esparsos pelo silenciamento aleatório de traços nas famílias CMP. Em continuação, foi analisado o efeito do empilhamento na obtenção do modelo de velocidade em profundidade pela inversão (não-linear, multiparmétrica) niptomográfica que utiliza para vínculo os atributos cinemáticos do campo de onda para estimar um modelo coerente com o dado.

Introdução

A qualidade do dado de reflexão sísmica, medida pela alta relação S/R , é uma característica importante para o processamento sísmico. Pena (2014) analisou o efeito do espaçamento não uniforme e esparso que pode resultar num prejuízo para a análise de velocidade aplicada, e sua aplicação no empilhamento e no imageamento da seção. A interpolação de dados nas seções pelo preenchimento de lacunas pode ser realizado normalmente por diferentes técnicas.

Müller (1999) descreveu o método CRS, onde a superfície de empilhamento aproxima o tempo de trânsito primário para o evento sísmico de forma mais precisa e consistente do que o operador NMO/DMO.

Baykulov and Gajewski (2007) apresentou uma consequência do operador CRS na interpolação, chamada de CRS-parcial, gerando superfamílias, onde lacunas são preenchidas, e melhorada a relação S/R das seções pré-empilhadas, empilhadas e migradas. Com isto, resulta em seções onde a frequência espacial de Nyquist, $f_N = \frac{1}{2\Delta x}$, é estendida, e a contaminação por amostragem muito diminuída.

Duveneck (2004) apresentou a inversão NIP-tomográfica para se obter uma distribuição de velocidades para o imageamento em profundidade, onde vínculos são fortes e estabelecidos pelos atributos CRS obtidos no processo de empilhamento.

Empilhamento CRS

O operador CRS dado pela equação (1) depende das coordenadas espaciais deslocamento do ponto-médio

$(x_m - x_0)$ e meio-afastamento (h), e o processo produz uma seção simulada ao afastamento-nulo. No processo são estimados os atributos de frente de onda: ângulo de emergência (α_0), o raio de curvatura da onda NIP (R_{NIP}), e o raio de curvatura da onda N (R_N) relativos ao ponto de referência $P_0(x_0, t_0)$.

$$t^2(x_m, h) = \left(t_0 + 2 \frac{\sin \alpha_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + 2t_0 \frac{\cos^2 \alpha_0}{v_0} \left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right). \quad (1)$$

A Figura 1 exemplifica o CRS-parcial, que é baseado numa superfície limitada para o empilhamento ao redor de um ponto-médio, e tempo de trânsito escolhido, $P_0(x_0, t_0)$, e o resultado da soma gera a amplitude de uma nova amostra. Repetindo este processo para todos os pontos temporais ao longo do traço, e para todos os CMP estabelecidos para a interpolação, produz a nova família CRS-superfamília.

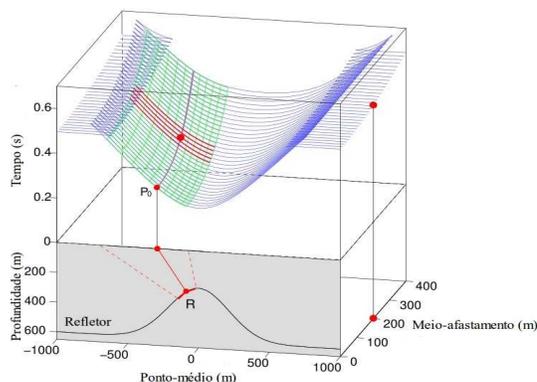


Figura 1: A superfície verde é do CRS convencional, que atribui o resultado ao ponto P_0 . A superfície vermelha é do CRS-parcial, e que coincide localmente com a superfície do CRS convencional. O CRS-parcial preenche a lacuna no ponto central da superfície vermelha.

A estimativa dos parâmetros do operador CRS (1) é realizada através de estratégias que utilizam casos particulares desta equação do tempo de trânsito. A busca tri-paramétrica é realizada no domínio do semblance que é desdobrada em problemas mais simples que envolvem apenas um parâmetro desconhecido como no caso NMO.

A Figura 2 ilustra o cálculo do tempo t'_0 do evento A no CRS-parcial, onde se usa a média dos atributos do CRS convencional. A amplitude é estimada como a média ao longo da superfície estabelecida.

O tempo t_0 exato que se ajusta perfeitamente na hipérbole do evento em questão é calculado pela equação (2) usando os parâmetros CRS utilizados na aproximação do tempo de trânsito t'_0 , esta equação é derivada de (1) após resolver a equação quadrática para $x_m = 0$, considerando

apenas valores positivos,

$$t_0 = -\frac{h_A^2 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{NIP}} + \sqrt{\left(\frac{h_A^2 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{NIP}}\right)^2 + t_A^2}. \quad (2)$$

A equação (3) calcula o tempo de trânsito da superfície do CRS-parcial, que utiliza os parâmetros correspondentes a t'_0 , e que é obtida substituindo t_0 da equação (2) na equação (1):

$$\begin{aligned} t^2(x_m, h) &= \left(-\frac{h_A^2 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{NIP}} + \sqrt{\left(\frac{h_A^2 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{NIP}}\right)^2 + t_A^2} + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 \\ &+ \frac{2 \cos^2 \alpha}{v_0} \left(-\frac{h_A^2 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{NIP}} + \sqrt{\left(\frac{h_A^2 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{NIP}}\right)^2 + t_A^2} \right) \\ &\left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h_A^2}{R_{NIP}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Ao longo desta superfície as amplitudes são somadas, e o resultado dividido pelo numero de traços envolvidos na somatória 2D, gerando assim um traço para compor uma superfamília CRS.

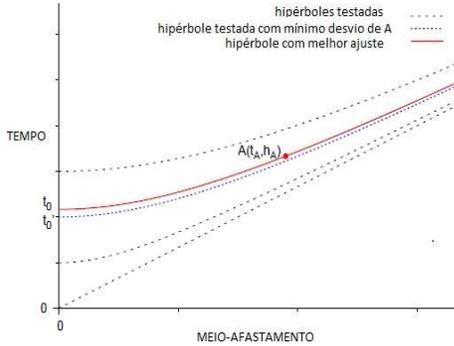


Figura 2: Curvas de tempos de trânsito testados para o melhor ajuste da hipérbole $A(t_A, h_A)$.

Inversão

A inversão tomográfica da onda NIP associada a cada ponto $P_0(t_0, \xi_0)$ é organizada com o tempo de trânsito do raio normal, $\tau_0 = \frac{t_0}{2}$, pela posição de emergência, ξ_0 , do raio normal, pelo parâmetro horizontal do raio, $p^{(\xi)}$, e pela derivada espacial de segunda ordem do tempo de trânsito, $M_{NIP}^{(\xi)}$. Estes dados de entrada são estimados a partir dos atributos CRS, e são organizado no vetor de entrada dado por:

$$\mathbf{d}_{obs} = (\tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0)_{i=1}^n, \quad (4)$$

onde n é o número de pontos marcados na seção CRS empilhada.

O modelo de velocidade é definido em uma malha com n_x e n_z nós na horizontal e vertical, respectivamente, e dado por:

$$v(x, z) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{ij} \beta_j(x) \beta_k(-z), \quad (5)$$

onde β_j e β_k são as funções de bases B-splines, e v_{ij} são os coeficientes a serem determinados no processo de inversão.

A Figura 3 exemplifica a tomografia da onda NIP 2D em subsuperfície, ponto (x, z) , e pela direção do raio normal dado ângulo de inclinação local θ . Sendo assim, o problema para estimar o modelo de velocidade consiste em achar as componentes do vetor \mathbf{m} definido por:

$$\begin{aligned} (x, z, \theta)_i^{(NIP)}, & \quad (i = 1, \dots, n_{\text{dados}}), \\ v_{jk}, & \quad (j = 1, \dots, n_x, k = 1, \dots, n_z). \end{aligned} \quad (6)$$

Sendo assim, existem $N_{\text{dados}} = 4n_{\text{dados}}$ dados de entrada, e $M_{\text{par}} = 3n_{\text{dados}} + n_x n_z$ parâmetros a serem determinados.

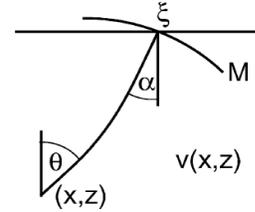


Figura 3: Componentes dos dados de entrada para a inversão contidos no vetor (4), e no modelo (6) para a inversão tomográfica da onda NIP.

O problema de inversão é ajuste de curvas, e consiste na busca de um modelo ótimo \mathbf{m} tal que o desvio entre o dado observado, \mathbf{d}_{obs} , e o correspondente teórico, $\mathbf{d}_{mod} = \mathbf{f}(\mathbf{m})$, seja minimizado no sentido dos quadrados-mínimos quadrados dos desvios $\Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})$, considerando uma \mathbf{C}_D matriz simétrica para a covariância dos dados, o que implica em erros não-correlacionáveis.

A série de Taylor é a técnica usada para linearizar a função desajuste na vizinhança de, \mathbf{m}_n , e dada por:

$$f(\mathbf{m}_n + \Delta \mathbf{m}) \approx f(\mathbf{m}_n) + \mathbf{F} \Delta \mathbf{m}, \quad (7)$$

onde \mathbf{F} é a matriz das derivadas $F_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial m_j}$, de \mathbf{f} no ponto \mathbf{m}_n .

Regularização é um conceito central em inversão, e as diferentes formas de regularização introduzidas estabelecem uma nova solução ao problema. A condição de suavidade é também necessária para assegurar a validação da teoria paraxial do raio ao redor de cada raio central, permitindo relaciona-la ao cálculo dos atributos CRS. Sendo assim, a função objeto de minimização é reescrita na forma:

$$\Phi(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{d}^T(\mathbf{m}) \mathbf{C}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) + \frac{1}{2} \epsilon'' \mathbf{m}^{(v)T} \mathbf{D}'' \mathbf{m}^{(v)}, \quad (8)$$

com o vetor dos parâmetros alterado para,

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}^{(NIP)} \\ \mathbf{m}^{(v)} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

A matriz \mathbf{D}'' é positiva definida, e representa a parte da regularização com a segunda derivada espacial para os parâmetros, o que penaliza a rugosidade do modelo. A quantidade ϵ'' pondera a participação entre os termos desajuste e regularização.

A aplicação do gradiente $\nabla_{\mathbf{m}} \Phi(\mathbf{m}) = \mathbf{0}$ na equação (8), é a condição para a minimização, e resulta nas equações

normais, de onde se constrói o sistema matricial para $\hat{\mathbf{F}}$ e para o vetor $\Delta\hat{\mathbf{d}}$ nas formas:

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_D^{-1/2}\mathbf{F} \\ \tilde{\mathbf{B}} \end{pmatrix} \text{ e } \Delta\hat{\mathbf{d}} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_D^{-1/2}\Delta\mathbf{d}(\mathbf{m}_n) \\ \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{m}_n \end{pmatrix}; \quad (10)$$

Com isto, o sistema a ser resolvido é reescrito na forma compacta dada por:

$$\hat{\mathbf{F}}^T \hat{\mathbf{F}} \Delta\mathbf{m} = \hat{\mathbf{F}}^T \Delta\hat{\mathbf{d}}. \quad (11)$$

A matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ tem por definição que $\tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{B}} = \varepsilon'' \tilde{\mathbf{D}}''$. As linhas da matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ em $\hat{\mathbf{F}}$ e $\Delta\hat{\mathbf{d}}$, que correspondem aos parâmetros NIP do modelo, são nulas.

Paige and Saunders (1982) apresentaram o algoritmo LSQR para a solução da equação (11), com um método eficiente para resolver sistemas lineares. O vetor modelo para a a iteração sucessiva é atualizado na forma:

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + \lambda \Delta\mathbf{m}_n; \quad (12)$$

onde $\lambda \leq 1$ é o fator de amortização dos passos $\Delta\mathbf{m}$.

Durante as iterações os valores \mathbf{m}_n são obtidos, e novos dados são calculados pelo traçamento dinâmico do raio. Se a função objeto de minimização em (8) aumenta, λ é diminuído, então $\Phi(\mathbf{m})$ é recalculada. Do contrário, a próxima iteração é iniciada calculando as derivadas de Fréchet para o novo modelo.

Resultados e Conclusões

Os experimentos, buscando a otimização e a sistematização para o empilhamento, seguido da inversão NIP-tomográfica ao modelo em profundidade, para o caso de dados sísmicos esparsos, foram organizados em três partes: CMP; CRS-convencional; e CRS-superfamília.

A figura 4 exibe o modelo sintético construído para simular o ambiente geológico, que foi baseado na descrição de Duvencek (2004). O modelo consiste em camadas homogêneas e isotrópicas limitadas por interfaces curvas suaves, com velocidades que varia de 2000m/s no topo, a 5000m/s na parte mais inferior. O modelo geológico deve satisfazer as exigências do modelo teórico, que é a teoria paraxial do raio sísmico.

Os experimentos com dados esparsos foram realizados com a eliminação drástica e aleatória de 80% dos traços da seção utilizando o programa *sukill*. O dado esparsado foi utilizado como entrada para a busca automática dos atributos do campo de onda, com uma abertura para o CRS-parcial de -1475 a +1475 na dimensão afastamento, e de 200m no tempo de trânsito de 0.3s à 300m em 2.7s na coordenada ponto-médio.

A malha construída ($n_x \times n_z$) para os experimentos foi definida com (23 x 16) nós, e os fatores de ponderação com $\varepsilon_{xx} = 0.004$ e $\varepsilon_{zz} = 0.0002$.

Como um exemplo, a figura 5 mostra o resultado na família CMP 200 antes e depois o empilhamento CRS-parcial. Observa-se como a relação S/R aumenta, e com isto a visualização dos eventos sísmicos é proeminente.

O empilhamento CRS-parcial tem dupla ação: gera uma nova família CRS que pode ser aumentada; interpola traços para preencher lacunas na família original. Com isto, permite estatisticamente melhora a relação S/R.

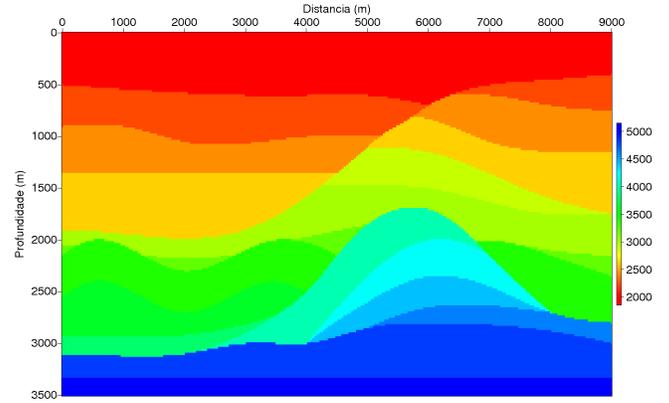


Figura 4: Modelo de velocidade em bloco.

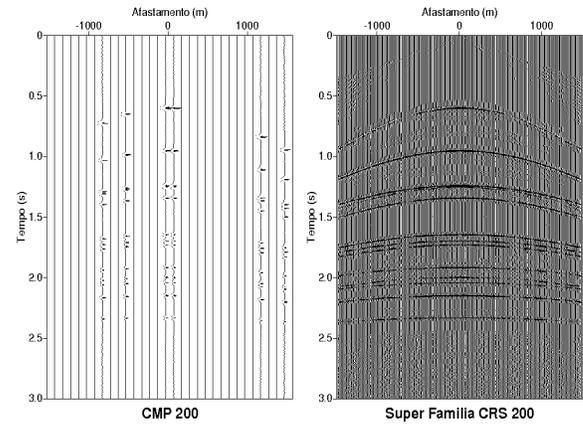


Figura 5: Família CMP 200 antes e depois do empilhamento CRS-parcial.

Inversão: CMP

A primeira parte foi referente ao empilhamento CMP usado como entrada na inversão NIP-tomográfica para obter o modelo de velocidade em profundidade. Foi realizado uma marcação automática que gera os dados observados de entrada a partir das seguintes seções: a empilhada CMP; a coerência semblance CMP; a R_{NIP} ; e a ângulo de emergência α . A coerência mínima para selecionar uma marcação (parâmetro *mincoher*) foi de 0,19. O total de marcações foi 399, e reduzida a 395 pontos após edição.

A figura 6 mostra o resultado da coerência no empilhamento CMP com valor máximo ao redor de 0,35.

A figura 7 mostra o resultado do empilhamento CMP, onde a presença de muitas lacunas nos eventos da seção empilhada pode ser observado.

A figura 8 mostra o modelo de velocidade obtido após 30 iterações utilizando um modelo inicial com velocidade constante, $v_0 = 2000\text{m/s}$. A marcação automática está distribuída sobre o resultado. Apesar do modelo inicial ser muito diferente do original, a NIP-tomografia foi capaz de reproduzir o aspecto geral do modelo de velocidade

original da figura 4.

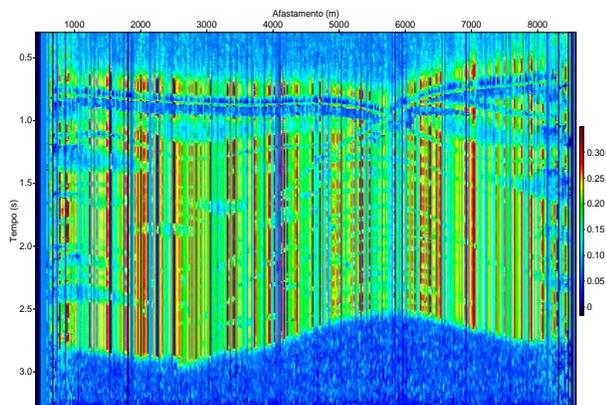


Figura 6: Seção coerência semblance resultante do empilhamento CMP-automático.

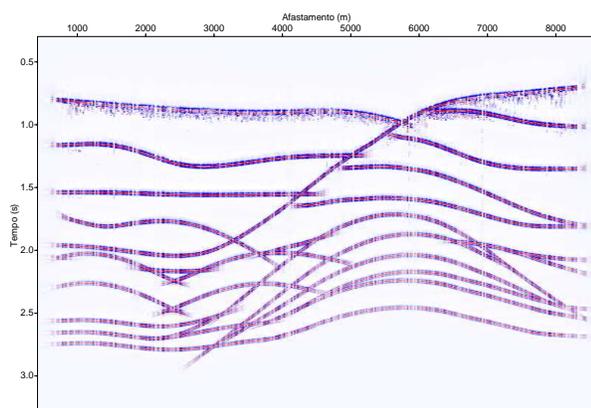


Figura 7: Seção empilhada CMP-automático

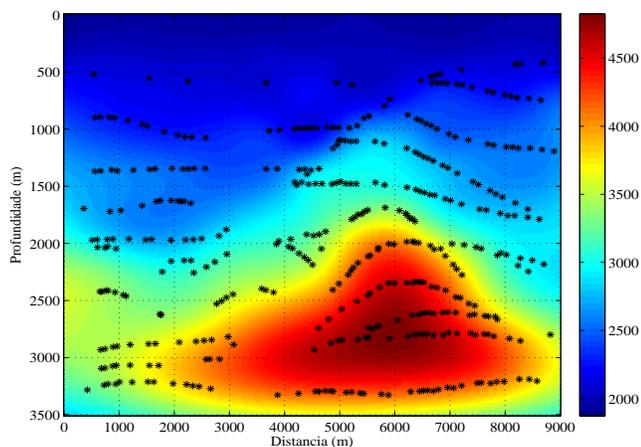


Figura 8: Modelo de velocidade resultante após 30 interações com as marcações da seção empilhada CMP-automática sobrepostas.

Inversão: CRS-convencional

A segunda parte foi referente ao empilhamento CRS-convencional usado como entrada na inversão NIP-tomográfica para também se obter o modelo de velocidade em profundidade. As seções de dados de entrada para a marcação automática foram: a empilhada CRS-otimizada; a otimizada R_{NIP} ; a ângulo de emergência α ; e a coerência semblance otimizada. Apesar de ter uma maior continuidade na coerência dos eventos, o valor de coerência máxima foi menor do que a resultante para o empilhamento CMP-automático. A coerência mínima válida para a marcação foi de 0,19, e o total de marcações foi de 352 pontos.

A figura 9 mostra a seção coerência, onde o valor máximo está ao redor de 0,25, e menor do que o caso CMP da primeira parte.

A figura 10 mostra o resultado do empilhamento CRS-convencional, o qual apresenta uma melhora considerável em relação à figura 7, uma vez que quase todas as lacunas foram preenchidas no empilhamento.

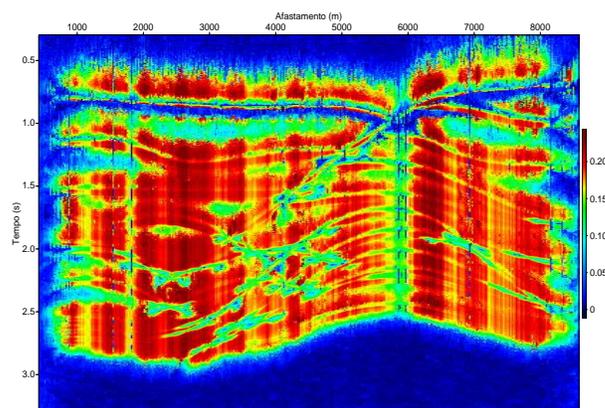


Figura 9: Seção coerência semblance resultante do empilhamento CRS-convencional.

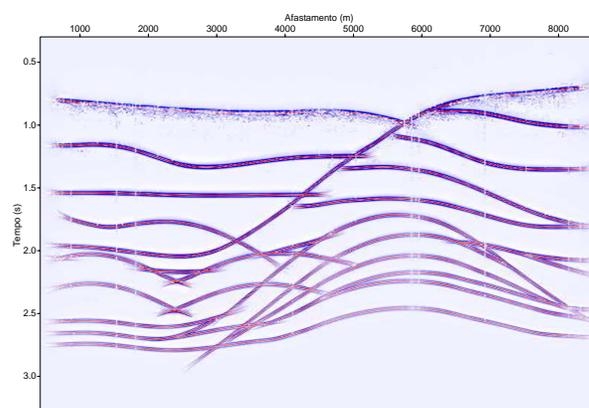


Figura 10: Seção empilhada CRS-convencional

A figura 11 mostra o modelo de velocidade obtido após 30 iterações utilizando um modelo inicial com velocidade constante, $v_0 = 2000\text{m/s}$. Em decorrência da baixa quantidade de pontos marcados, devido à baixa qualidade da seção coerência semblance (figura 9), a inversão NIP-tomográfica obteve um modelo de velocidade inferior ao da figura 8.

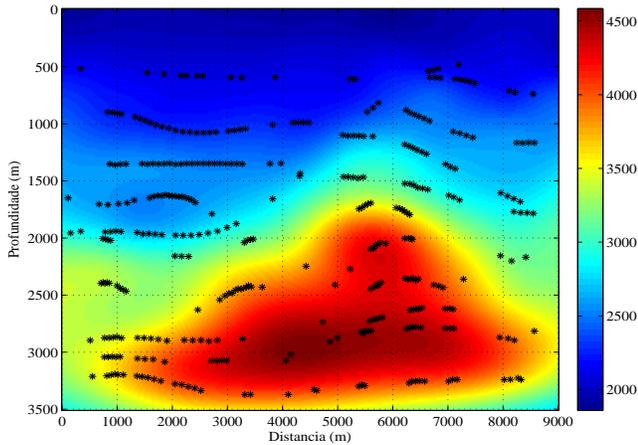


Figura 11: Modelo de velocidade resultante após 30 interações com as marcações na seção empilhada CRS-otimizada sobrepostas.

Inversão: CRS-superfamília

A terceira parte foi referente ao empilhamento CRS-convenção superfamília, e usado como entrada na inversão NIP-tomográfica para também se obter o modelo de velocidade em profundidade. Os dados de entrada ao programa de marcação automática foram as seguintes seções: a empilhada CRS-superfamília; a seção coerência semblance otimizada; a R_{NIP} otimizada; a ângulo de emergência α . O valor mínimo da coerência válida para marcação foi 0,70, o que corresponde a mais do que o triplo nos testes anteriores. O total de pontos marcados foi de 846, e reduzido a 830 após a edição.

A figura 12 mostra a seção coerência, onde o valor máximo está notadamente ao redor de 1,00 e, portanto, o mais alto, e servindo de medida para a alta qualidade da medida da relação S/R .

A figura 13 mostra a seção empilhada CRS-superfamília, que resulta numa seção com uma melhor relação S/R e continuidade dos eventos em comparação às figuras 7 e 10.

A figura 14 mostra o modelo de velocidade obtido após 30 iterações utilizando um modelo inicial com velocidade constante, $v_0 = 2000\text{m/s}$. Nota-se como a seção com uma alta coerência semblance (ver figura 12), cujo o valor máximo está ao redor de 0,9, gerada pelo método de empilhamento CRS-parcial, aumenta a confiabilidade dos atributos CRS, e são determinantes para se obter um modelo de velocidade próximo ao modelo original.

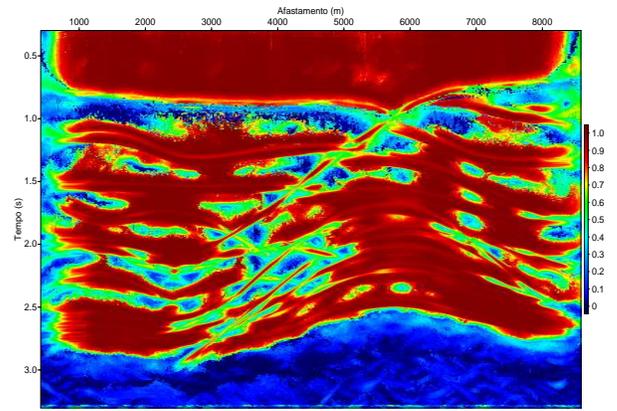


Figura 12: Seção coerência semblance resultante do empilhamento CRS-superfamília.

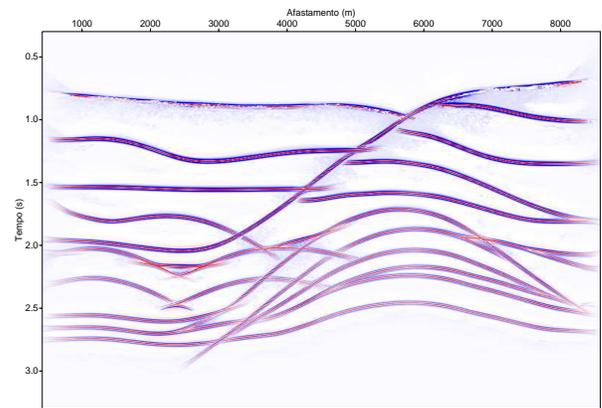


Figura 13: Seção empilhada CRS-superfamília.

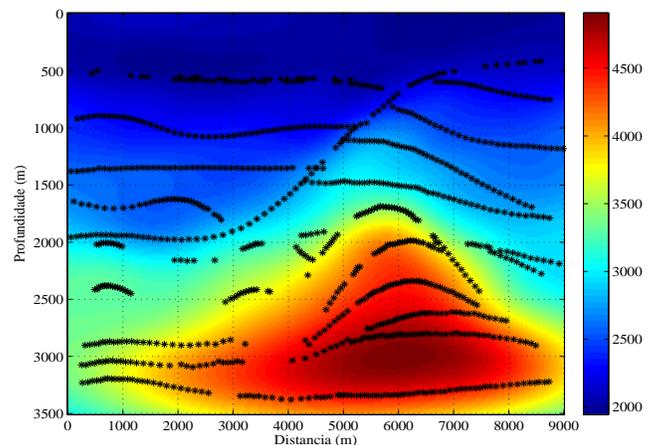


Figura 14: Modelo de velocidade resultante após 30 interações com as marcações da seção empilhada CRS-superfamília sobrepostas.

A figura 15 mostra a maior quantidade de pontos marcados nas seções CRS-superfamília, e também a

maior concentração de pontos em um intervalo menor de erro residual. Observa-se que se obteve um melhor ajuste dos parâmetros analisados quando utiliza-se as seções CRS-superfamílias, principalmente em relação ao parâmetro p .

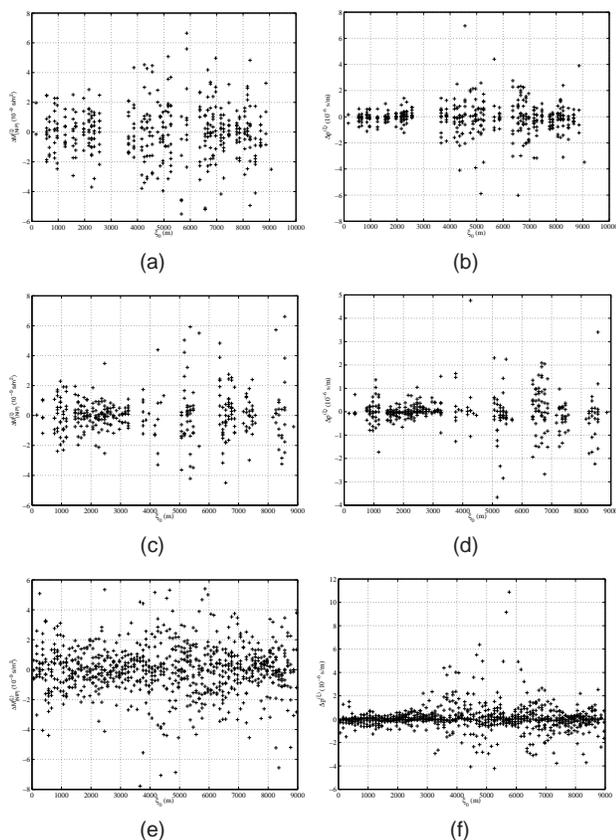


Figura 15: Resultados após 30 iterações da inversão NIP-tomográfica. Erro residual da inversão para os parâmetros M_{NIP} e p . (a) e (b) utilizando a seção CMP-automática; (c) e (d) CRS-convencional; e (e) e (f) para CRS-superfamília.

Com base nos testes realizados, concluímos que o empilhamento CRS-parcial melhora a qualidade dos dados com efeito positivo para a obtenção do modelo de velocidade com a inversão NIP-tomográfica. Neste estudo, salientamos o emprego do CRS-parcial especialmente para dados esparsos, como importante para o empilhamento e a consequente inversão NIP-tomográfica.

Referências

- Baykulov, M., and Gajewski, D., 2007, Prestack seismic data enhancement with crs parameters: WIT, , no. 11, 50–61.
- Duveneck, E., 2004, Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes: Ph.D. thesis, Karlsruhe University, Karlsruhe.
- Müller, T., 1999, The common reflection surface stack method-seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model: Ph.D. thesis, Karlsruhe University, Karlsruhe.
- Paige, C. C., and Saunders, M. A., 1982, Algorithm 583 – Isqr: Sparse linear equations and least squares problems: ACM Trans. Math. Softw., **8**, no. 2, 195–209.
- Pena, F., 2014, Processamento e imageamento sísmico usando o crs: Master's thesis, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará.

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições brasileiras UFPA, o CNPq, e em especial ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, INCT-GP, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Os agradecimentos são também estendidos aos parceiros do Consórcio WIT-Karlsruhe-Hamburgo, Alemanha, pela cooperação acadêmica.