



Inversão de Velocidades Intervalares pela Fórmula de Dix e pela Decomposição por Valores Singulares: Comparação com Pacotes de Processamento Sísmico

Valter Marques dos Santos Neto, IGEO/UFBA
Amin Bassrei, IF/UFBA e CPGG/UFBA

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III 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.

Abstract

The determination of interval velocities is an ultimate goal in exploration seismology, either as a final product or a input for some procedure in seismic data processing, like migration. In this work we compare the interval velocities obtained by using seismic processing packages with the Dix equation and by an inverse problem approach via singular values decomposition (SVD). The two approaches provided results equivalent to those obtained with processing packages. The inverse problem approach allows the incorporation of prior information, which is more effective in underdetermined linear systems.

Introdução

A obtenção do campo de velocidades intervalares é de fundamental importância no processamento de dados sísmicos. A velocidade intervalar corresponde à velocidade de propagação do pulso sísmico em um dado material ou numa dada camada geológica. Uma vez obtida, a estimativa precisa do campo de velocidades intervalares nos permite caracterizar o meio analisado além de garantir resultados mais confiáveis e que podem abranger outras partes do processamento de dados sísmicos a exemplo da correção NMO e migração.

Nos pacotes de processamento de dados sísmicos, as velocidades intervalares são obtidas a partir das velocidades RMS através da utilização da fórmula de Dix (1955). Uma abordagem alternativa para obtenção das velocidades intervalares é a formulação e solução do problema inverso correspondente. A inversão de velocidades intervalares é um exemplo clássico de aplicação da teoria geofísica de inversão em problemas abordados pela sismologia de exploração além de apresentar vantagens quanto a sua utilização quando comparado com outros métodos para obtenção de velocidades intervalares.

Processamento de Dados Sísmicos e Análise de Velocidade

O objetivo principal do processamento de dados sísmicos é a obtenção do máximo possível de informações a cerca da geologia de subsuperfície. O processamento é constituído de várias etapas que se resumem a aplicação de operações matemáticas aos dados sísmicos mediante algoritmos computacionais com a finalidade de obter imagens que melhor representem o comportamento da geologia em subsuperfície de uma determinada região. O processamento é feito obedecendo à aplicação de um fluxograma ao dado sísmico sendo este constituído de várias etapas. Dentre as etapas básicas estão: Montagem da geometria do dado, edição, filtragem, análise de velocidade, correção NMO (*normal move out*) e empilhamento.

A análise de velocidade é uma etapa de fundamental importância no processamento de dados sísmicos. Mediante a análise de velocidade é obtido o campo de velocidades, que de um modo geral é o campo de velocidades RMS (*root mean square*). A velocidade RMS se refere à trajetória percorrida pela onda ou pulso sísmico, sendo igual à média quadrática das velocidades intervalares das camadas que a onda percorreu, dada por:

$$V_{RMS}^2(t) = \frac{1}{t} \int_0^t v^2(t') dt',$$

onde $v^2(t)$ é o quadrado da velocidade intervalar. De um modo geral a velocidade RMS representa a velocidade combinada de todas as camadas que a onda percorreu. A velocidade intervalar corresponde à velocidade média de propagação do pulso sísmico em um dado material ou camada geológica, para uma camada homogênea e isotrópica a velocidade intervalar é a velocidade de propagação da onda na camada em subsuperfície (Telford et al., 1976). A obtenção do campo de velocidades intervalares é de fundamental importância no processamento de dados sísmicos. A estimativa precisa do campo de velocidades intervalares nos permite caracterizar o meio analisado além de proporcionar o cálculo preciso das velocidades RMS e NMO. A velocidade NMO se refere às linhas de reflexão sísmicas para diferentes offsets, sendo que a determinação de velocidade NMO permite remover o efeito de afastamento entre fonte e receptor.

Considerando um modelo de camadas planas e horizontais, a velocidade NMO pode ser considerada igual à RMS, uma vez que nessas condições a velocidade RMS pode ser considerada como um caso particular de velocidade NMO.

Formula de Dix

A fórmula de Dix (1955) foi deduzida a partir de um modelo de camadas homogêneas e interfaces planas para o cálculo de velocidades intervalares e espessura das camadas por meio da velocidade RMS. Ela é expressa como

$$v_j^2 = \frac{T_j V_{RMS}^2(T_j) - T_{j-1} V_{RMS}^2(T_{j-1})}{T_j - T_{j-1}},$$

onde v_j é a velocidade intervalar na camada j , T_j é o tempo duplo de trânsito até a interface j considerando afastamento nulo entre fonte e receptor, e V_{RMS} é a velocidade RMS.

Decomposição por Valores Singulares

O conceito de inversa generalizada foi desenvolvido por Moore e posteriormente por Penrose (1955). Uma maneira usual de obter a inversa generalizada, também chamada de pseudo-inversa é através da decomposição de valores singulares (SVD). A SVD consiste em uma técnica de decomposição matricial que permite a fácil obtenção da matriz inversa em casos onde a matriz envolvida no problema é não quadrada, possui posto incompleto ou é mal condicionada. O resultado obtido é a matriz inversa generalizada, pseudo-inversa ou matriz de Moore-Penrose (G^+), que se trata de uma generalização da matriz inversa (G^{-1}) no caso onde a matriz envolvida no problema é quadrada e de posto completo, podendo substituir a matriz inversa na obtenção de parâmetros para modelos geofísicos via solução do problema inverso (Hatton et al., 1986). A decomposição consiste em decompor $G_{M \times N}$ de modo que:

$$G = U \Sigma V^T,$$

onde $U_{M \times M}$ é a matriz que contém os vetores ortonormais da matriz GG^T , $\Sigma_{M \times N}$ é a matriz que contém os valores singulares, a raiz quadrada dos autovalores da matriz $G^T G$, e $V_{N \times N}$ é a matriz formada pelos vetores ortonormais da matriz $G^T G$.

Desta forma, facilmente obtemos a pseudo-inversa da matriz G segundo a equação:

$$G^+ = V \Sigma^+ U^T,$$

sendo: G^+ a matriz inversa generalizada ou pseudo-inversa; e Σ^+ a matriz formada pelo inverso dos valores singulares da matriz $G^T G$ de modo que:

$$\Sigma^+ = \begin{bmatrix} E & \\ & \end{bmatrix},$$

onde E é a matriz diagonal que contém o recíproco dos valores singulares de G na diagonal principal, isto é, $e_{ii} = \sigma_i^{-1}$.

Metodologias Utilizadas

Foram utilizadas duas metodologias para obtenção do campo de velocidades intervalares. A primeira metodologia foi a aplicação da fórmula de Dix para obtenção de velocidades intervalares mediante a construção de um programa na linguagem FORTRAN90 em dados de velocidade RMS. Essa metodologia foi aplicada em um exemplo sintético e posteriormente a um dado real com a finalidade de validar a utilização da fórmula de Dix. No caso da aplicação em dado real, o objetivo foi comparar o campo de velocidades intervalares obtido pelo programa FORTRAN com campo de velocidades intervalares proveniente do software FOCUS versão 5.3 da Paradigm Geophysical.

A segunda metodologia aplicada aos dados de velocidade RMS foi utilização da teoria da inversão para obter o campo de velocidades intervalares. Essa abordagem consiste em tratar a obtenção do campo de velocidades intervalares como a solução de um problema inverso. A formulação do problema direto clássico em geofísica é:

$$\mathbf{d} = G\mathbf{m},$$

onde: \mathbf{d} é o vetor de dados observados, \mathbf{m} é o vetor de parâmetros do modelo, e G a matriz que relaciona os dados observados com os parâmetros do modelo. No nosso caso (Bassrei, 1990), temos que:

$$d_j = T_j V_{RMS}^2(T_j), j = 1, \dots, M,$$

e

$$m_i = v_i^2, i = 1, \dots, N.$$

O campo de velocidades intervalares é obtido a partir das velocidades RMS via solução do seguinte problema inverso:

$$\mathbf{m} = G^+ \mathbf{d},$$

sendo G^+ a matriz inversa generalizada obtida via SVD.

Aplicação em Dados Sintéticos

A aplicação em dados sintéticos consistiu na construção de um modelo geológico simples de subsuperfície e aplicação da metodologia com finalidade de verificação e validação. O modelo, construído por intermédio de um programa FORTRAN, consiste em um meio geológico formado por quatro camadas homogêneas e isotrópicas, com interfaces planas e horizontais. No modelo foram fixadas as velocidades intervalares e RMS de cada camada. A partir do modelo, foram aplicadas as duas metodologias (Dix e SVD) para obtenção das velocidades intervalares que posteriormente foram comparadas com as velocidades do modelo. A Tabela 1 mostra os parâmetros do modelo sintético. A Figura 1 mostra que os resultados foram satisfatórios uma vez que as velocidades intervalares encontradas foram iguais as velocidades do modelo.

Camada	Tempo (ms)	Vint. (m/s)	VRMS (m/s)
1	300	2000	2000,00
2	560	1600	1825,22
3	700	2800	2057,46
4	1000	3900	2743,39

Tabela 1: Parâmetros do modelo sintético.

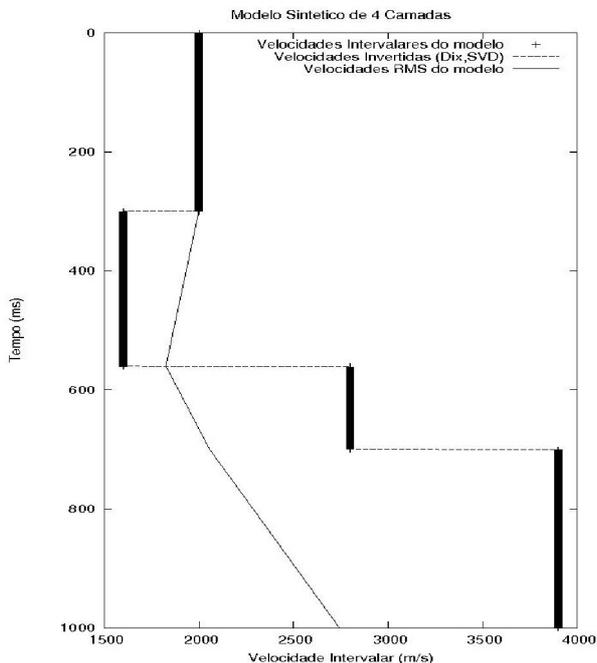


Figura 1: Velocidades intervalares do modelo e obtidas por Dix e SVD.

Aplicação em Dados Reais

Na etapa de aplicação das metodologias em dados reais, foram utilizados dados de uma linha sísmica no formato SEG-Y proveniente de um levantamento marítimo realizado na bacia de Jequitinhonha no sul da Bahia, e que faz parte do acervo de dados do CPGG-UFBA. Levando em consideração a natureza do trabalho não havia necessidade de se trabalhar com todo o dado, assim sendo, a linha foi cortada em 4s resultando em 1001 amostras. Parâmetros de aquisição da linha:

Descrição dos Parâmetros	Parâmetros Utilizados
Lanço (m)	0-150-3125
Intervalo entre receptores (m)	25
Intervalo entre tiros (m)	25
Número de tiros	1577
Número de canais	120
Intervalo de amostragem (ms)	4
Número de amostras	1751
Tempo de registro (s)	7,00
Afastamento mínimo (m)	150
Afastamento máximo (m)	3125

Tabela 2: Parâmetros de aquisição da linha sísmica.

O processamento básico composto por etapas fundamentais de preparação dos dados (geometria, edição, mute dos traços), filtragem usando filtro de frequência e análise de velocidade foi feita utilizando o software FOCUS da Paradigm Geophysical. A Figura 2 mostra o fluxograma com as etapas do processamento.

O filtro de frequência utilizado foi o passa-banda e as frequências de corte utilizadas foram escolhidas baseadas no espectro de amplitude dos principais refletores do dado. A Figura 3 mostra as frequências de corte utilizadas no filtro passa-banda.

Após a etapa de análise de velocidade foi possível obter o campo de velocidades RMS e intervalar do dado. A Figura 4 mostra o campo de velocidades RMS obtido pelo FOCUS. A etapa posterior foi utilizar o campo de velocidades RMS proveniente da análise de velocidades no FOCUS com dado de entrada no programa FORTRAN para obtenção do campo de velocidades intervalares mediante a fórmula de Dix e via solução do problema inverso com uso da SVD.

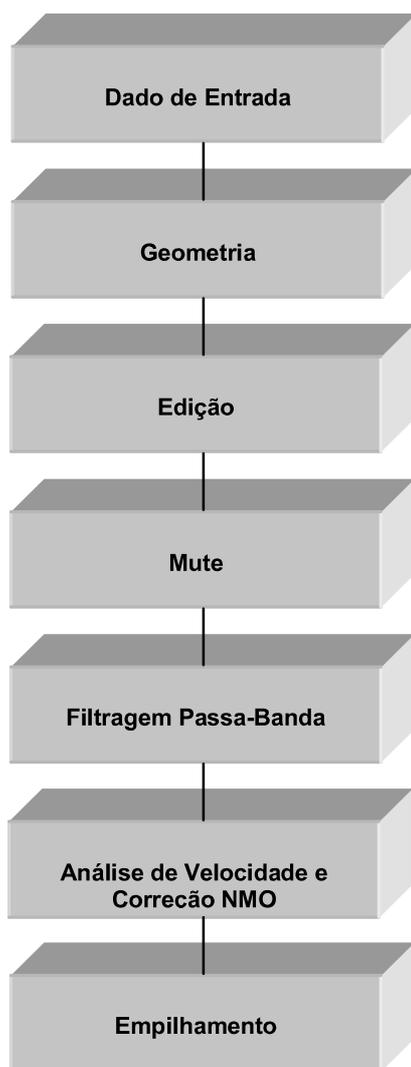


Figura 2: Fluxograma de Processamento Convencional.

A Figura 5 mostra o campo de velocidades intervalares obtido pelo FOCUS. O campo de velocidades RMS obtido no FOCUS foi exportado através de um arquivo Ascii. O arquivo Ascii contendo os pares tempo e velocidades RMS foi utilizado como entrada no programa FORTRAN que calculou as velocidades intervalares correspondentes via a fórmula de Dix e via solução do problema inverso usando SVD. As velocidades intervalares encontradas foram exportadas do programa FORTRAN, também, via arquivo Ascii e usadas como entrada em uma SHELL-SCRIPT montada para realizar a interpolação dos tempos e velocidades intervalares e construção de um arquivo binário de campo de velocidades para ser visualizado pelo programa XIMAGE pertencente à suíte do pacote SEISMIC UNIX (SU) da Colorado School of Mines. Esse processo foi realizado também com o campo de velocidades RMS com fins exclusivamente comparativos (Figura 6). Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, uma vez que o campo de velocidades intervalares obtido via fórmula de Dix foi muito próximo do obtido pelo pacote, o que validou o uso da fórmula. O resultado obtido com campo de velocidades proveniente da solução do problema inverso usando a SVD foi o mesmo que o obtido via a fórmula de Dix (Figura 7). As etapas de correção NMO (usando o campo obtido via inversão) e empilhamento foram feitas no SU (Figura 8). Esse resultado proveniente da utilização da SVD aplicada a dados reais é de fundamental importância para a validação de sua utilização como forma de obtenção do campo de velocidades intervalares.

A vantagem da aplicação da formulação do problema inverso usando SVD é a possibilidade de utilização da informação a priori. A utilização desse tipo de informação consiste, por exemplo, na utilização de dados de perfis como o sônico ou densidade como ponto de partida da inversão o que resulta na obtenção de estimativas mais confiáveis a respeito das velocidades intervalares.

Conclusões

Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios e consistentes mostrando a real utilização da fórmula de Dix pelos pacotes de processamento de dados sísmicos para obtenção das velocidades intervalares por intermédio do campo de velocidades RMS do dado sísmico. Os resultados decorrentes da utilização da fórmula de Dix serviram como um referencial para avaliação dos resultados obtidos pela inversão do campo de velocidades RMS via SVD. A abordagem da obtenção do campo de velocidades intervalares como um problema inverso e sua solução por intermédio do SVD se mostrou bastante precisa e válida principalmente quando seus resultados são comparados com os resultados provenientes da utilização da fórmula de Dix. Esse resultado é relevante principalmente ao levar-se em consideração o potencial da utilização desse tipo de abordagem, cujo diferencial se mostra na possibilidade da utilização de informação a priori para obtenção de estimativas de velocidades intervalares mais confiáveis.

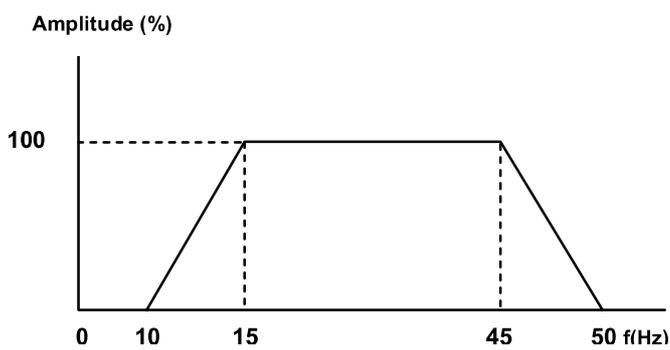


Figura 3: Filtro trapezoidal passa-banda e as frequências utilizadas.

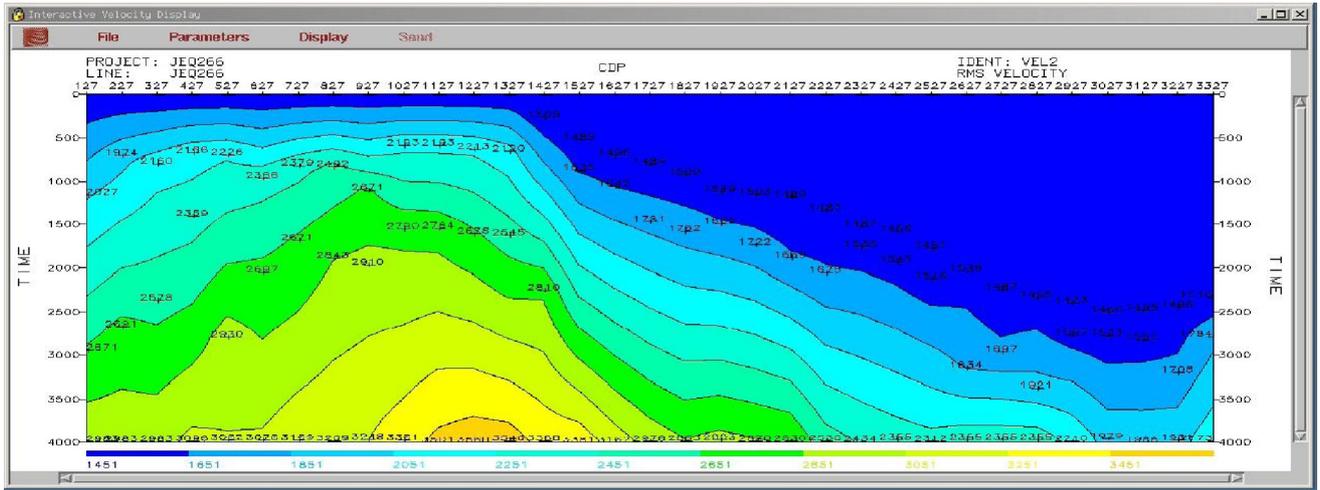


Figura 4: Campo de Velocidades RMS do FOCUS

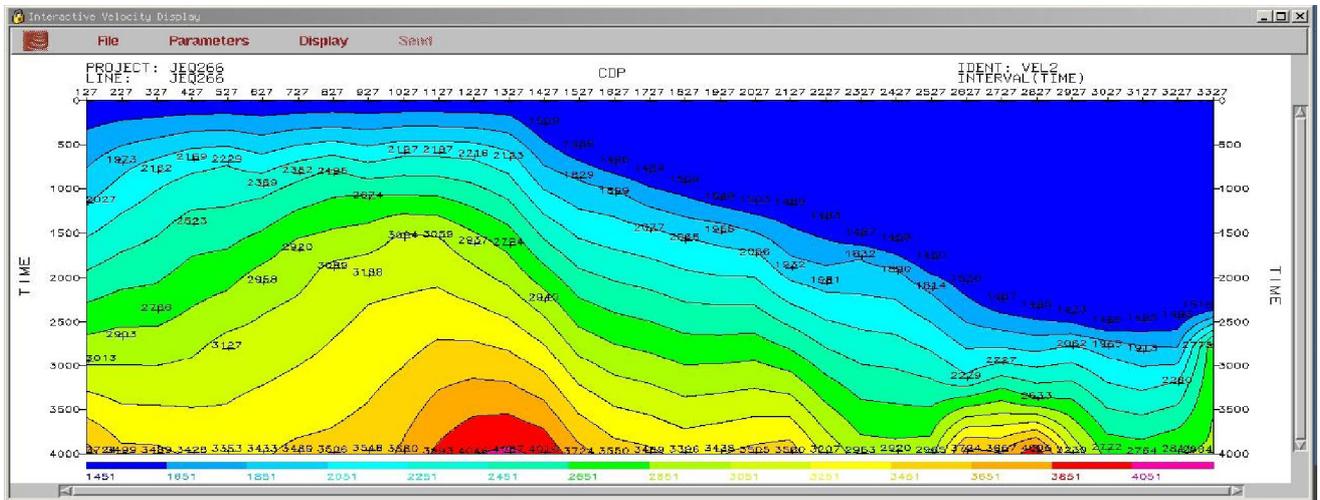


Figura 5: Campo de Velocidades intervalares do FOCUS

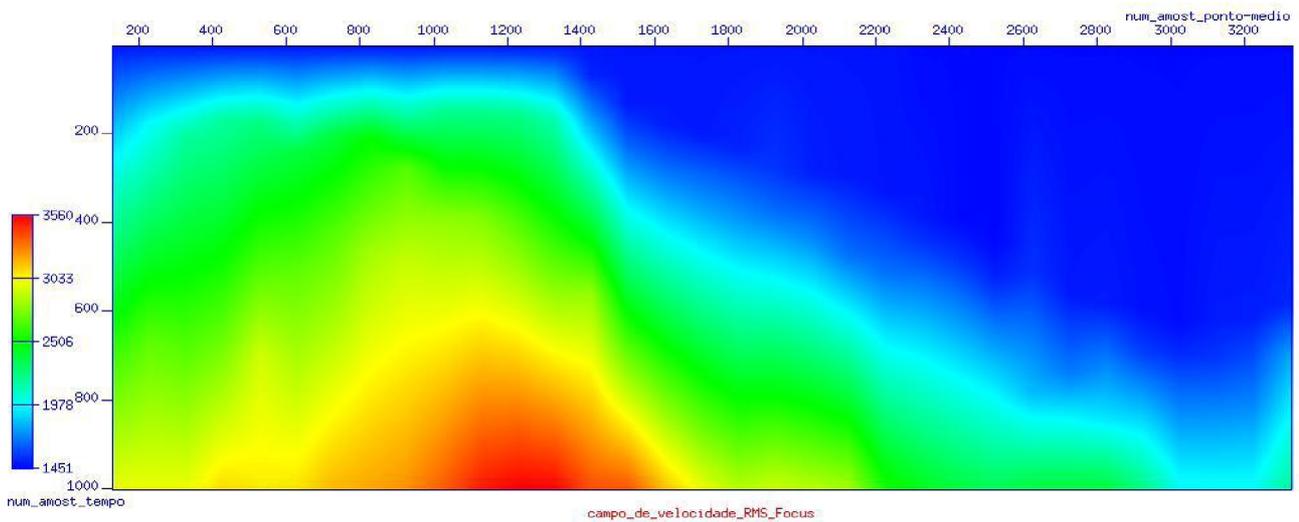


Figura 6: Campo de Velocidades RMS do FOCUS usando XIMAGE (SU).

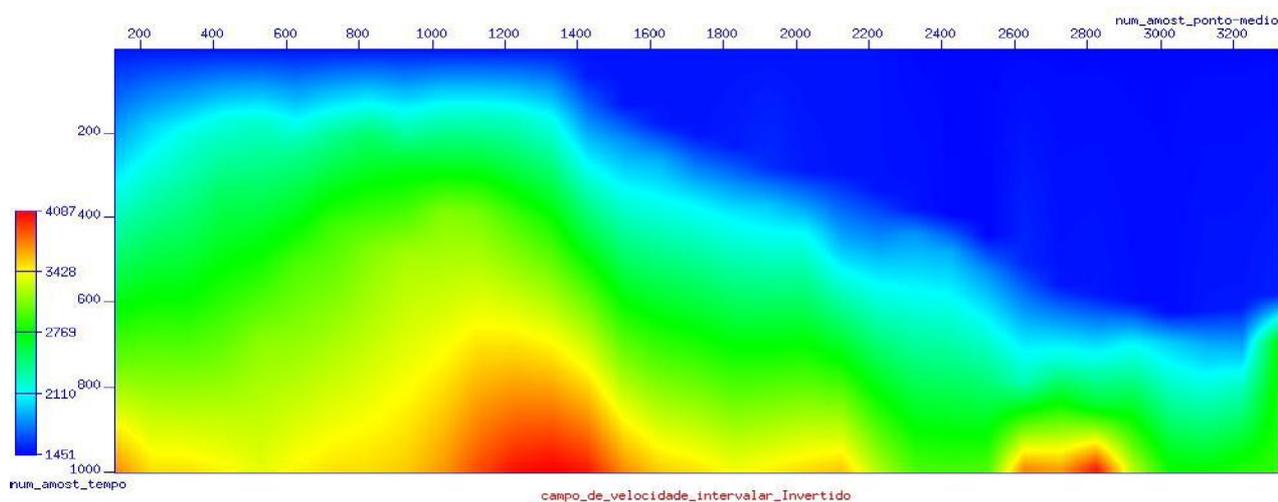


Figura 7: Campo de Velocidades intervalares obtido via Dix e SVD.

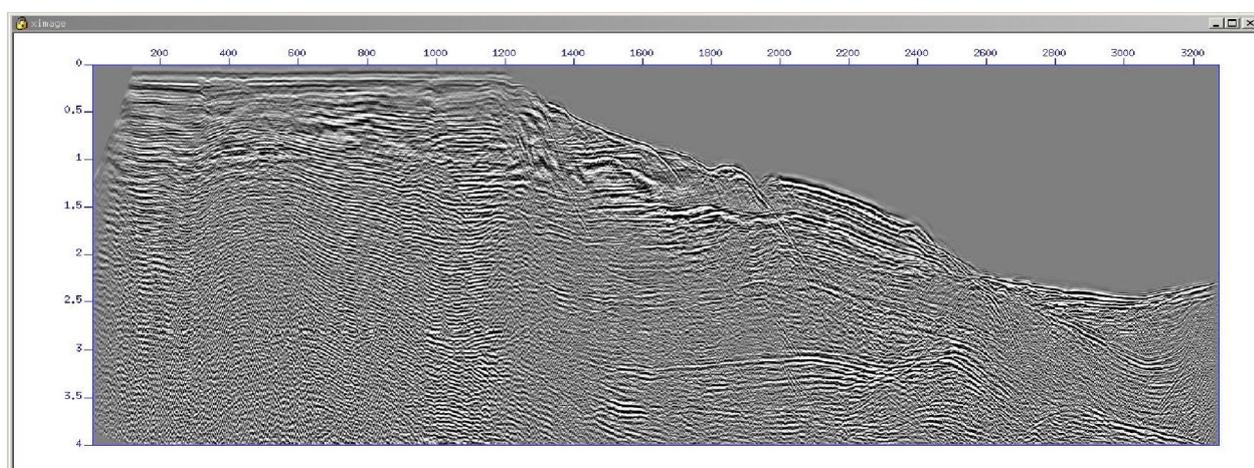


Figura 8: Dado empilhado.

Agradecimentos

Agradecemos à Paradigm Geophysical pela licença educacional do software FOCUS, à PETROBRAS e ao CNPQ/PRONEX/FAPESB pelo apoio à Rede 01 - Rede Cooperativa NNE em Geofísica de Exploração. V. M. Santos Neto agradece pela bolsa de IC do projeto Rede 01 – Fase II (recursos PETROBRAS). A. Bassrei agradece ao CNPq pelos projetos 484.239/2006-6 (Edital Universal MCT/CNPq 02/2006) e 308.875/2007-9 (bolsa de pesquisa).

Referências

- Bassrei, A., 1990. Inversão de Dados Geofísicos Unidimensionais através da Entropia Relativa Mínima, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.
- Penrose, R., 1955. A generalized inverse for matrices, Proceedings of The Cambridge Philosophical Society, 51, 406-413.
- Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements, Geophysics, 20, 68-86.
- Hatton, L., Worthington, M. H. & Making, J., 1986, Seismic Data Processing, Blackwell, Oxford.
- Telford, N. H., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., & Keys, D. A., 1976, Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.