



Migração sísmica 2D pré-empilhamento em profundidade com os métodos “Split-step”, “Split-step” híbrido e “Split-step” - PSPI: Uma Comparação

Gary Corey Aldunate(*), Reynam C. Pestana (*) & Paul. L. Stoffa (**)
(*) CPGG-UFBA, (**) Univ. of Texas at Austin; Institute for Geophysics

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Three 2D depth prestack migration techniques using split-step type extrapolation operators were developed and tested in seismic data sorted in common shot gathers. In the first method, named here as simultaneous split-step migration (SS-S), the migration is carried out simultaneously for the sources and receivers using split-step operators. The recorded receiver data is depropagated in depth and the source's wavefield is propagated both using split-step operators. The final depth section is achieved summing all the frequencies of interest during the correlation process of propagated and depropagated wavefields, for each depth level and by the sum of all migrated shots. In order to diminish yet the computational time of the SS-S method, we choose the alternative of calculate the direct wave traveltimes, through a finite difference solution of eikonal equation. This second method is called hybrid split-step migration (SS-H). In the third migration method we combining the SS-S with PSPI methods. In this case the wavefields are depropagated using split-step operators for different velocities and then interpolated them as in the PSPI method. We called this method SS-PSPI. The choice of split-step migration method is mainly due to its easy implementation and also because it has shown high accuracy and robustness even in situations with very strong lateral velocity variation.

The results we present in this work were obtained using the Marmousi data and also the SEG-EAGE salt model, which present very high geologic complexity. The results obtained with the three different methods were compared and all shown satisfactory images.

Introdução

A migração sísmica é um processo que tem por base a equação da onda, corrige distorções de registros de reflexões, localiza os eventos nas suas verdadeiras posições espaciais e colapsa a energia das difrações até seus pontos de espalhamento (Gray et al., 2001).

O desenvolvimento da interpretação sismoestratigráfica, a determinação de potencial de hidrocarbonetos a partir de medidas de amplitude, a delimitação de reservatórios,

demandam uma boa qualidade das seções sísmicas obtidas através do processamento sísmico. Para áreas geologicamente complexas a migração pré-empilhamento é mais indicada e, portanto, esta técnica se constitui numa ferramenta muito importante na localização de reservatórios. Muitos dos métodos desenvolvidos para meios homogêneos foram adaptados, através de diferentes correções, que pudessem levar em consideração a variação lateral existente no campo de velocidades. Entre os métodos que atuam no domínio $f-k$ (frequência-número de onda), o método de migração por mudança de fase em duas etapas desenvolvido por Freire (1988) e por Stoffa et al. (1990) tem sido bastante utilizado na indústria de petróleo. Popovici (1996) implementou a correção “split-step” para dados ordenados em afastamento e ponto médio baseado na equação DSR, Yilmaz (2000). Pestana (1997) aplicou o método de Popovici (1996) na migração de dados ordenados em famílias de afastamento comum, através do método de fase estacionária. Mais recentemente, Pestana et al. (2000) estenderam o método “split-step” para a migração de dados ordenados em famílias de parâmetro de raio constante. Logrado (2002) testou diferentes técnicas do método de correção de fase em duas etapas, para dados ordenados em famílias de raio comum. Aldunate (2002) usou operadores de extrapolação “split-step” na migração de dados sísmicos 2D de tiro comum. Todos esses métodos foram aplicados com sucesso em dados provenientes de meios com forte variação lateral de velocidade.

O Método “split-step”

A migração “split-step” (Stoffa et al., 1990) é baseada na teoria da perturbação, de acordo com a qual pode-se dividir o campo de velocidade lateralmente variante num termo constante, média da velocidade, mais um pequeno termo de perturbação: $v(x, z) = \bar{v}(z) + \delta v(x, z)$. O operador de migração “split-step” pré-empilhamento para migrar famílias de tiro comum, pode ser expresso como (Aldunate, 2002; Ji, 1995):

$$W = e^{ip_1 \Delta z} F^{-1} e^{ip_2 \Delta z}, \quad (1)$$

onde os deslocamentos de fase são, $p_1 = \omega \delta u(x, z)$ e $p_2 = k_z$ (onde $k_z = \sqrt{\bar{u}^2 \omega^2 - k_x^2}$), que trabalham nos domínios (x, ω) e (k, ω) , respectivamente. O termo de perturbação, definido a partir da vagarosidade ao invés da velocidade, é definido como $\delta u(x, z) = 1/\delta v(x, z)$ e a transformada inversa de Fourier é denotada por F^{-1} .

Assim, primeiro faz-se a extrapolação através do deslocamento de fase com p_2 , que leva em conta a correção da média da vagarosidade $\bar{u}(z)$, depois muda-se de domínio através de uma transformada espacial inversa de Fourier, para em seguida aplicar o segundo deslocamento de fase, p_1 , que tem por objetivo corrigir a variação lateral de velocidade.

No método SS-S a propagação dos campos de onda é executado por um operador de propagação unidirecional, não obstante os campos de onda das fontes e receptores são propagados separadamente, consequentemente o campo de onda da fonte é propagado a partir da superfície de registro e o campo de onda dos receptores é depropagado (propagação reversa no tempo) também a partir da mesma superfície. Para descrever esse processo, introduzimos a notação matricial, a qual nos permitirá observar mais claramente a forma como agem os operadores de extrapolação. Começamos desde o registro sísmico dos tiros na superfície z_n (Berkhout, 1982):

$$g_j(z_0) = F(z_0, z_0) s_j(z_0), \quad (2)$$

onde $F(z_0, z_0)$ é o operador avante. Nele temos representados a matriz refletividade R e os operadores de propagação W , que tem a forma:

$$F(z_0, z_0) = \sum_{n=1}^N W(z_0, z_n) R(z_n) W(z_n, z_0), \quad (3)$$

na Equação (2) tem-se o vetor tiro $s_j(z_0)$ e o vetor medido $g_j(z_0)$ (correspondente aos receptores) referindo-se a um experimento sísmico na superfície $z = z_0$, com a fonte em $x = x_j$. A equação (3) mostra os operadores de propagação $W(z_n, z_0)$ e $W(z_0, z_n)$ que quantificam todos os efeitos da propagação (descendente e ascendente, respectivamente) entre os níveis de profundidade z_0 e z_n , $R(z_n)$ é a matriz de reflexão para cada nível de profundidade z_n .

Na migração pré-empilhamento, a extrapolação dos campos de onda da fonte $[s(z_n)]$ e do receptor $[g(z_n)]$ é recursiva para cada nível de profundidade z_n :

$$s(z_n) = W(z_n, z_m) s(z_m), \quad (4)$$

e

$$g(z_n) = W^*(z_n, z_m) s(z_m), \quad (5)$$

onde * denota o adjunto e implica que o campo de ondas ascendentes (registrado pelos receptores) é extrapolado reversamente no tempo (depropagado), e o campo de ondas descendentes (gerado pelas fontes) é extrapolado

diretamente também, ou seja, é feita a propagação para baixo a partir da fonte.

Substituindo-se as duas últimas Equações (4) e (5) na Equação (2), obtemos:

$$g(z_n) = W^*(z_n, z_0) W(z_0, z_n) R(z_n) W(z_n, z_0) s(z_0), \quad (6)$$

além disso, assumimos que o operador de extrapolação W é pseudo-unitário (Aldunate, 2002; Ji, 2001), então a Equação (6) se reduz a

$$g(z_n) = R(z_n) s(z_n). \quad (7)$$

Usando esta última relação (7), começamos o processo de migração para recuperar a matriz refletividade $R(z_n)$ a partir de $g(z_n)$ e $s(z_n)$ para cada nível de profundidade z_n .

A condição de imagem na migração pré-empilhamento, no domínio do tiro comum, é obtida deconvolvendo-se o campo de onda descendente com o campo de onda ascendente no domínio espaço-freqüência (x, ω) e assim temos:

$$r(x, z_n) = \sum_{\omega} \frac{g(x, z_n, \omega) s^*(x, z_n, \omega)}{s(x, z_n, \omega) s^*(x, z_n, \omega) + \varepsilon}, \quad (8)$$

onde ε representa um valor positivo pequeno introduzido para estabilizar a divisão. A imagem é obtida somando-se sobre todas as freqüências para extrair a componente da refletividade no tempo zero. O esquema deste método é mostrado na Figura 1(a). A implementação do algoritmo pré-empilhamento em profundidade SS-S é mostrada no fluxograma da Figura 1(b).

Já o método SS-H caracteriza-se por correlacionar dois campos de onda, onde os tempos de cada campo de onda são calculados de forma distinta e separada (Aldunate, 2002; Jiao, 2001), daí o nome híbrido. Os tempos de percurso correspondentes ao campo de onda dos receptores, $P_r(x, z, \omega)$, são computados de maneira implícita, usando-se o método "split-step"; enquanto os tempos de trânsito, $t_s(x, z)$, tempos desde a fonte a cada ponto (x, z) na malha, correspondentes ao campo de onda da fonte $[e^{i\omega t_s(x, z)}]$, são calculados a partir da equação eiconal, tal como se faz na migração Kirchhoff (Schneider, 1978; Akbar, Sen e Stoffa, 1996), que considera os tempos das primeiras chegadas por ser a mais simples e rápida, e portanto, assumindo que a primeira chegada é a principal contribuição do campo incidente.

Usando o princípio de imagem, descrito acima, correlacionamos ambos os campos: os campos de onda das fontes (com tempos de trânsito calculados com a

equação eiconal) e os campos de onda dos receptores extrapolados com o operador “split-step”. Desta forma a imagem é construída através da correlação cruzada destes campos,

$$IMAGEM (X , Z) = \sum_{\text{tiros}} \sum_{\omega} [e^{i\omega t_s(x,z)}] \cdot P_r (x , z , \omega) , \quad (9)$$

ou seja, somando-se sobre todos os tiros e todas as frequências. No processo de construção da imagem, as amplitudes dos traços sísmicos são distribuídas a todos os pontos possíveis da seção de saída, em conformidade com a informação da tabela dos tempos de percurso, e sendo os refletores reconstruídos em profundidade, nos pontos onde as primeiras chegadas da onda direta coincidem no tempo com as dos campos ascendentes, Figura 2.

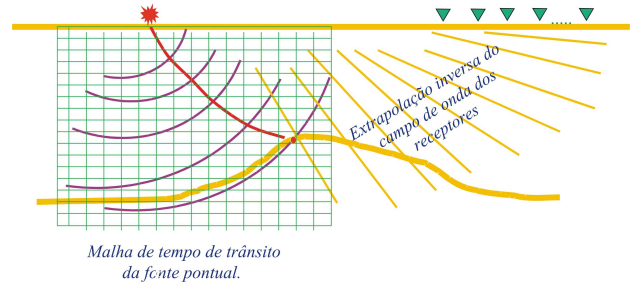
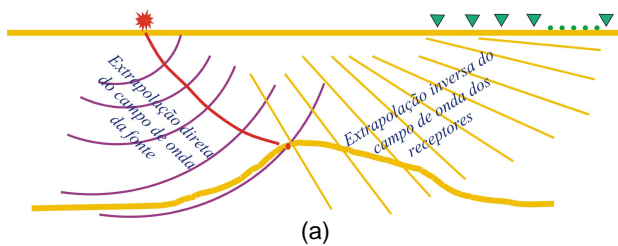


Figura 2 – Extrapolação reversa do campo de onda dos receptores e cálculo dos tempos de trânsito para a fonte. (procedimento usado no método de migração SS-H).

Experimentou-se também a combinação dos métodos SS-S e PSPI (método SS-PSPI), com a finalidade de melhorar ainda mais a reconstituição dos refletores em profundidade. Diferentemente do método SS-S, ao invés de usar apenas a velocidade de referência, usou-se várias velocidades de referência e aplicou-se a correção “split-step” para cada velocidade selecionada. Assim, o campo de onda de cada profundidade foi obtido interpolando-se os campos de referência, baseados na relação entre a velocidade verdadeira local e as velocidades de referência.

Resultados numéricos

Aplicou-se as três técnicas de migração, descritas acima, em dados sísmicos pré-empilhados ordenados em famílias de ponto de tiro comum nos modelos Marmousi e domo de sal SEG-EAGE.

O dado sintético Marmousi, que se converteu num popular examinador de algoritmos de migração, é um dado acústico 2D de estrutura complexa baseado na geologia da bacia de Cuanza em Angola. O estilo estrutural é dominado por falhas de crescimento, as quais se levantam desde um truncamento de sal até chegar à complicada estrutura de velocidade na parte superior do modelo, Figura 3(a). O modelo de pseudo-refletividade é mostrado na Figura 5(a), onde os refletores fortes correspondem ao maior contraste de velocidade presente na seção. O resultado da migração será comparado com esta seção de refletividade que é calculada derivando-se o campo de velocidades nas direções vertical e horizontal (Han, 2000). Um total de 240 famílias de tiros foram geradas, a seção de afastamento nulo é mostrada na Figura 3(b), com um espaçamento entre tiros de 25 m. Os tiros são dados a partir de 2 km indo até os 8 km. Dentro de cada família de tiro tem-se 96 traços com um intervalo de grupo de 25 m, o afastamento mais próximo é de 200 m e o afastamento mais distante de 2750 m, com 750 amostras a 4 ms de intervalo, cada traço contém 3 s de dado.

Os principais alvos da migração são as regiões indicadas com as setas A, B e C na Figura 3(a), apontando reservatórios de hidrocarbonetos. Sob as falhas os campos de onda são distorcidos, criando efeitos complexos na sua propagação. Na parte central do

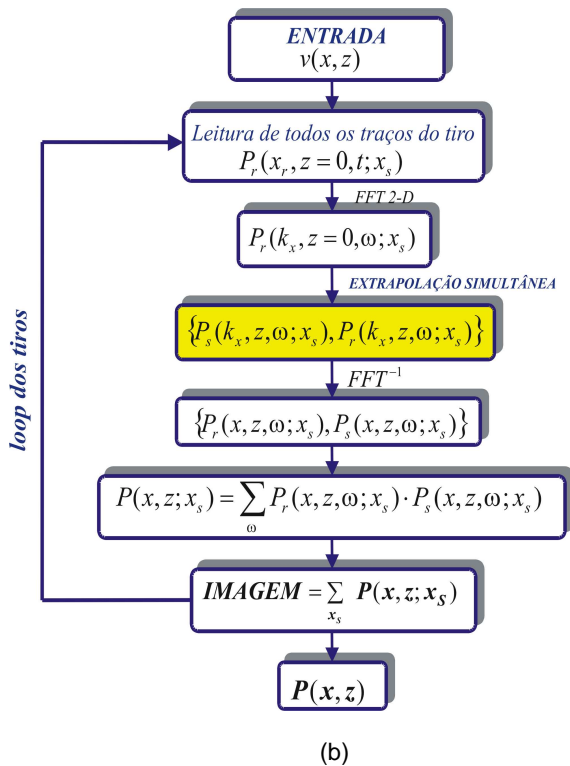


Figura 1 – (a) Esquema de extrapolação simultânea dos campos de onda (fonte e receptores), método SS-S, (b) e seu fluxograma com as principais etapas.

modelo, três falhas são indicadas com as setas $F1$, $F2$ e $F3$ com ângulos de mergulho de 37, 50 e 70 graus, respectivamente. A Figura 5(c) é o resultado da migração SS-S, nela observa-se uma continuidade lateral, coerência nos refletores e o alvo A é identificável. A falha $F3$ apresenta uma excelente resolução. A migração obtida com esse método apresenta uma imagem de alta qualidade, o que demonstra a eficiência do método SS-S, na presença da alta complexidade estrutural como a do modelo Marmousi. Em uma máquina Pentium IV- 800Hz, 2Gb de memória, o tempo de execução neste modelo foi de aproximadamente 4 h. Já a técnica SS-H levou 3 h de processamento, apresentando um bom desempenho computacional. Mas, como se observa na Figura 5(b), os refletores reconstituídos ao redor das três falhas não estão focalizados e a zona embaixo dela não é interpretável. Ainda verificamos que o alvo A é pobremente visualizado, contudo os refletores horizontais, nas partes laterais do modelo, foram otimamente imageados. Com um custo computacional de quase 8 h de máquina, a técnica SS-PSPI apresenta o melhor resultado (Figura 5(d)), sendo superior ao SS-S pela melhor focalização de algumas partes do modelo, especialmente na parte superior das falhas, onde também se nota uma melhor amplitude dos refletores na zona do anticlinal. O alvo A, com esse método, foi excelentemente reconstituído, demonstrando que entre os métodos testados ele foi o que melhor imageou os dados marmousi.

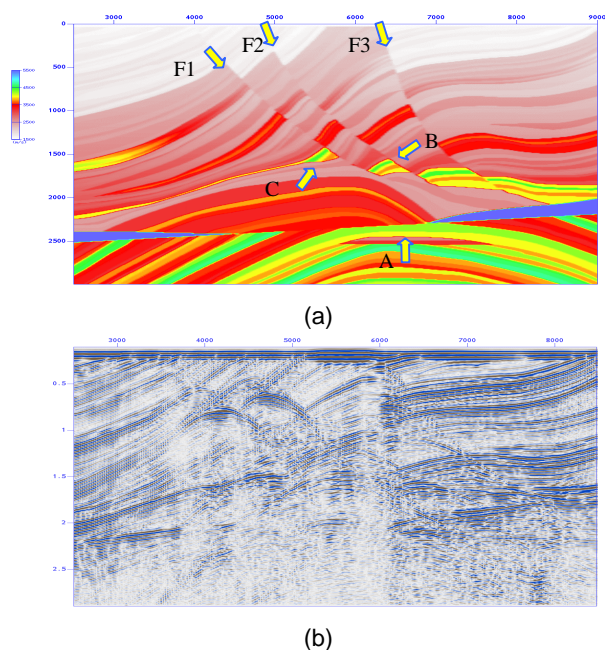


Figura 3 – (a) Campo de velocidades do dado Marmousi (a) e a seção de afastamento nulo (b).

O dado sintético pré-empilhamento SEG-EAGE consiste de 325 famílias de tiros. Para cada tiro tem-se 176 receptores com um espaçamento de 24,384 m, com afastamento máximo de -4291,584 m (receptores à

esquerda do tiro). O intervalo de tiro é de 48,768 m. O intervalo de amostragem é de 8 ms e com 626 amostras por traço. O modelo de velocidades 2D é mostrado na Figura 4(b). O corpo de sal apresenta um forte contraste de velocidade com sua vizinhança e uma superfície muito rugosa na parte superior. As principais feições geológicas, além do corpo de sal, são as falhas de forte mergulho, o refletor que define a parte superior do corpo de sal que é irregular apresentando pontas agudas, a base do domo quase horizontal e as estruturas presentes embaixo dele são razoavelmente nítidas. No modelo de pseudo-refletividade para comparação dos resultados é mostrado na Figura 6(a), com o forte contraste de velocidade destacado pela forte amplitude (refletores coloridos) dos refletores que delineiam o corpo de sal. Por tudo isso, a forma irregular do corpo, combinado com o alto contraste de velocidade, causam problemas na visualização sísmica do dado, como se nota na Figura 4(b), que mostra a seção de afastamento nulo.

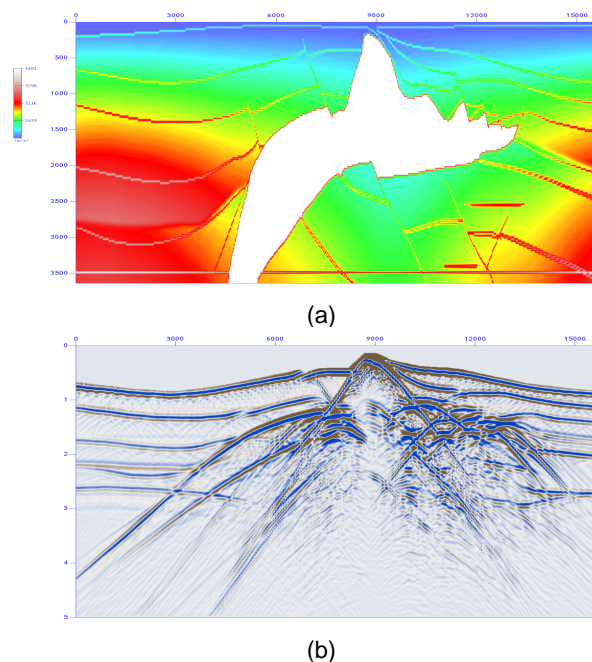


Figura 4 – (a) Campo de velocidades do modelo de sal SEG-EAGE e (b) seção de afastamento nulo.

Os resultados das migrações SS-H e SS-S são mostradas nas Figuras 6(a) e 6(b), respectivamente. O resultado obtido com a técnica SS-H mostra sem muita nitidez o refletor que delinea a parte superior rugosa do modelo. De um modo geral, a seção migrada apresenta uma imagem muito pobre na região abaixo do corpo de sal. Superando as limitações do método SS-H, no resultado apresentado pela seção migrada SS-S, nota-se que a parte superior rugosa encontra-se bem definida, sendo estes refletores perfeitamente visíveis. As estruturas embaixo do corpo de sal também apresentam uma boa focalização. Entretanto, o refletor horizontal à profundidade de 3500 m, localizado embaixo do corpo de sal, não apareceu corretamente imageado, como esperado. Já os outros refletores que delineiam o corpo de sal foram bem reconstituídos pelo método SS-S.

Quanto ao método de migração SS-PSPI, verificamos, através do resultado da migração para os dados SEG-EAEG, que este método também apresenta uma imagem de melhor qualidade que os demais métodos. A seção migrada mostra uma boa reconstituição dos principais refletores, tanto os laterais quanto os localizados diretamente abaixo do domo de sal, que agora aparecem mais claramente focalizados. Todavia, a qualidade dos resultados está diretamente ligada ao alto custo computacional exigido pelo método.

Conclusões

Os três métodos de migração sísmica 2D pré-empilhamento em profundidade usando operadores de extrapolação "split-step" foram testado nos dados sintéticos Marmousi e SEG-EAEG, os quais representam situações realísticas de alta complexidade geológica. Os resultados numéricos apresentados pelos métodos SS-PSPI e SS-S forneceram imagens migradas de alta qualidade, atestando a capacidade desses métodos baseados em extrapoladores do tipo "split-step", no imageamento de estruturas complexas com forte contraste lateral de velocidade associados a fortes mergulhos.

O bom desempenho dos métodos de migração, quanto à qualidade das seções migradas, deve-se ao fato de os métodos terem sido implementados em seções de tiro comum e, por conseguinte, da utilização de diferentes partes do campo de velocidades (região compreendida pelo tiro e os receptores), durante o processo de imageamento. Entre as grandes vantagens dos métodos SS-S e SS-PSPI podemos destacar a implementação bastante simples através de operadores de extrapolação "split-step", teoricamente válidos até 5 graus em regiões de variação lateral de velocidade, mas como verificamos através dos exemplos numéricos apresentados aqui, mesmo em modelos de forte variação lateral, apresentaram resultados excelentes. Quanto ao método SS-H, creditamos o seu baixo desempenho ao fato de utilizar no imageamento os tempos de percurso apenas das primeiras chegadas. Por outro lado, os métodos SS-S e SS-PSPI, utilizam durante o processo de imageamento, o campo de onda com todas as possíveis chegadas em cada ponto da imagem do modelo em profundidade.

Quanto ao desempenho computacional dos métodos SS-PSPI e SS-S, os mesmos forneceram resultados de boa qualidade, mas a um custo bastante alto, quando comparado com o tempo de processamento exigido pelo método SS-H.

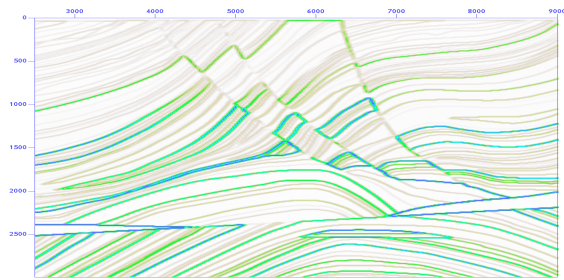
Agradecimentos

Os dois primeiros autores gostariam de agradecer à ANP (Agência Nacional de Petróleo), PETROBRAS e ao CPGG/UFBA pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Reynam Pestana agradece ao CNPq pelo

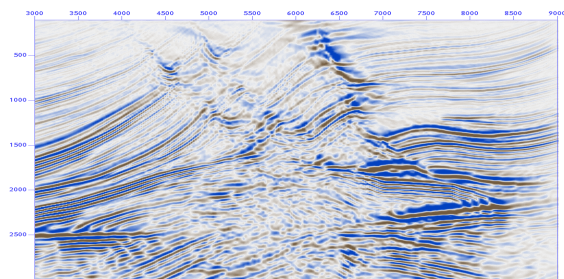
suporte, através de bolsa de pesquisa, processo 300.312/88-1 (RM).

Referências Bibliográficas

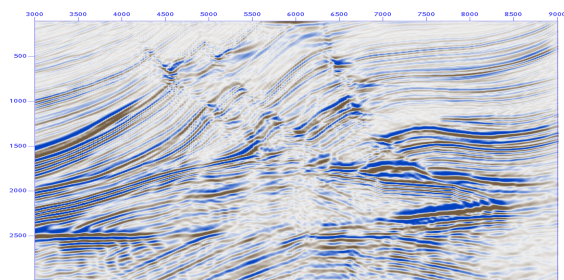
- AKBAR, E.; SEM K. & STOFFA L., 1996**, Prestack plane-wave Kirchhoff migration in laterally media, *Geophysics*, 61:1068-1079.
- ALDUNATE, P. G. C., 2002**, Migração Pré-empilhamento Usando Operadores de Extrapolação tipo "split-step", Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- BERKHOUT, J., 1982**, Seismic Migration: Imaging of acoustic energy by wavefield extrapolation. A. Theoretical aspects, Elsevier Science Publishers Co.
- FREIRE, R. M. L., 1988**, Migração Por Mudança de Fase em Duas Etapas, Tese de doutorado, PPPG/UFBA, Salvador, Bahia.
- GRAY, S. H., J. E. J. D. E WHITMORE, D., 2001**, Seismic migration problems and solutions, *Geophysics*, 66.
- HAN, B., 2000**, A Comparison of Four Closely Related Depth Migration Methods, Master's thesis geophysics, Center for Wave Phenomena of Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Ji, J., 2001**, Angle-dependent reflectivity recovery by planewave synthesis imaging, In: Stanford Exploration Project, www.stanford.edu/docs/sep84, vol. Report 84.
- JIAO, J., 2001**, Residual Migration Velocity Analysis in the Plane Wave Domain: Theory and Applications, Ph.d's thesis geophysics, University of Texas.
- LOGRADO, J. C. G., 2002**, Migração 2-D pré-empilhamento em profundidade utilizando técnicas de correção de fase em duas etapas, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- PESTANA, R. C. e COSTA, M. S., 1997**, Migração em duas etapas de dados ordenados em offset comum, In: 5th Int. Cong. Brás. Geofísica, Extend Abstracts, pp. 163-166, SBGF.
- PESTANA, R. C.; STOFFA, P. L. e SANTOS, J. R. S. B., 2000**, Plane wave prestack time migration, In: SEG 70th Annual Meeting, pp. 810-813.
- POPOVICI, M. A., 1996**, Prestack migration by split-step DSR, *Geophysics*, 61:1412-1416.
- SCHNEIDER, A., 1978**, Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*, 43:49-76.
- STOFFA, P. L.; FOKKEMA, J. T.; FREIRE, R. M. L. e KESSINGER, W. P., 1990**, Split-step migration, *Geophysics*, 55:410-421.
- YILMAZ, O., 2000**, Seismic Data Processing, SEG, Tulsa, Oklahoma.



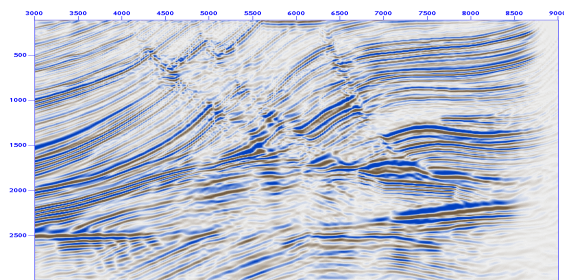
(a)



(b)



(c)

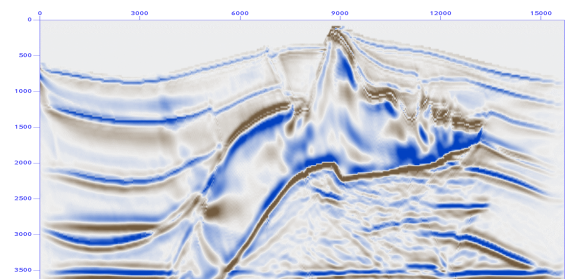


(d)

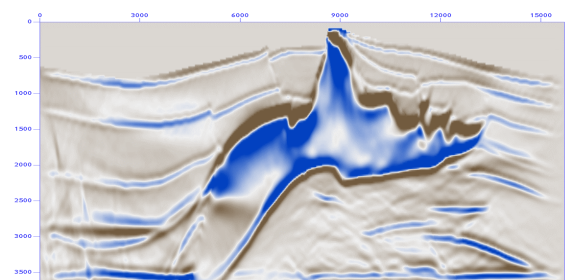
Figura 5 – (a) Modelo de pseudo-refletividade a partir do campo de velocidades Marmousi, (b) Resultado da migração SS-H, (c) SS-S, (d) SS-PSPI.



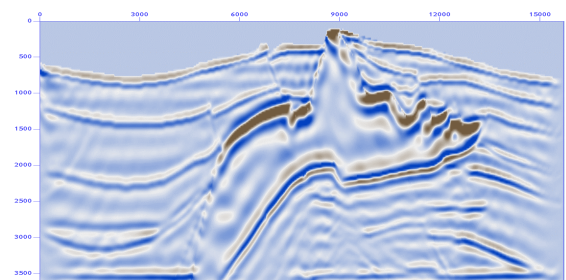
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6 – (a) Pseudo-refletividade do modelo SEG-EAGE, (b) Resultado da migração SS-H, (c) SS-S, (d) SS-PSPI.