

MIGRAÇÃO SÍSMICA 2-D PRÉ-EMPILHAMENTO EM PROFUNDIDADE COM OPERADORES DE EXTRAPOLAÇÃO “SPLIT-STEP”

Gary C. Aldunate¹, Reynam C. Pestana² e Paul L. Stoffa³

Recebido em 31 maio, 2004 / Aceito em 5 outubro, 2004
Received May 31, 2004 / Accepted October 5, 2004

ABSTRACT. Three 2D prestack depth migration techniques using split-step extrapolation operators were developed and tested on seismic data sorted into common shot gathers. In the first method, which we name simultaneous split-step migration (SS-S), the migration procedure is carried out simultaneously for the sources and receivers. The recorded receiver data are depropagated in depth and the source wavefield is downward propagated using the split-step operators for both. The final depth section is achieved by summing all the frequencies of interest after the correlation of the propagated and depropagated wavefields, for each depth level and by the sum of all migrated shot gathers. To decrease the computational time of the SS-S method, we can calculate the source wavefield's through a finite difference solution of the eikonal equation. This second method we call the hybrid split-step migration method (SS-H). In the third migration method, we combine the SS-S with the PSPI method. In this case the wavefields are depropagated using split-step operators for different velocities and then interpolated as in the PSPI method. We called this method PSPI-SS. The choice of the split-step operator for migration is mainly due to its easy implementation, 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 differentes methods were compared and all show satisfactory images.

Keywords: Prestack migration, split-step operator, common shot migration.

RESUMO. Três métodos de migração 2-D pré-empilhamento em profundidade usando operadores de extrapolação “split-step” foram desenvolvidos e testados em dados sísmicos ordenados em famílias de tiro comum. No primeiro método, chamado de migração “split-step” simultâneo (SS-S), a migração é realizada simultaneamente para as fontes e receptores usando-se operadores de extrapolação do tipo “split-step”. Os dados registrados nos receptores são depropagados em profundidade e a propagação da fonte é simulada utilizando-se operadores “split-step” em ambos os procedimentos. A imagem final, ou seção migrada em profundidade, é obtida somando-se todas as frequências de interesse durante o processo de correlação dos campos propagados e depropagados, para cada nível de profundidade e somando-se todos os tiros migrados. Visando diminuir o tempo computacional do método de migração SS-S, implementamos um segundo método, cujo cálculo dos tempos da fonte é realizado através da solução por diferenças finitas da equação iconal. Este segundo método é referido como método híbrido (SS-H). O terceiro método de migração desenvolvido e implementado é o resultado da combinação dos métodos SS-S e “Phase-shift Plus Interpolation” (PSPI). Neste caso, os campos de ondas são depropagados para diferentes velocidades e interpolados, como no método PSPI convencional. Ele é aqui denominado de método PSPI-SS. Quanto à escolha do operador de extrapolação “split-step” se deve, principalmente, à sua facilidade de implementação computacional e por apresentar imagens migradas de boa precisão e, também, pela sua robustez, mesmo em situações de forte contraste lateral de velocidade. Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos usando-se dados sintéticos, gerados a partir dos modelos Marmousi e EAGE/SEG, modelos em profundidade que apresentam uma alta complexidade geológica. Os resultados foram comparados entre si e os três métodos apresentaram imagens migradas bastante satisfatórias.

Palavras-chave: Pré-empilhamento, operador “split-step”, migração de tiro comum.

¹Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG), Universidade Federal da Bahia, 123, Campus Universitário da Federação - CEP: 40170-290 – Salvador, Ba – Brasil. Tel: (71) 2038531; Fax: (71) 2038501 – E-mail: gcap@cpgg.ufba.br

²Depto. de Geofísica Nuclear, Instituto de Física/CPGG, Universidade Federal da Bahia, 123, Campus Universitário da Federação - CEP: 40170-290 – Salvador, Ba – Brasil. Tel: (71) 2038521; Fax: (71) 2038501 – E-mail: reynam@cpgg.ufba.br

³Department of Geologic Sciences and Institute for Geophysics, The University of Texas at Austin, 4412 Spicewood Springs Rd., Bldg. 600. Austin, TX 78759-8500, U.S.A. Tel: 1-512-471-0464; Fax: 1-512-471-8844 – E-mail: pauls@ig.utexas.edu.

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 e a delimitação de reservatórios demandam uma boa qualidade das seções obtidas através do processamento sísmico. Para áreas geologicamente complexas a migração pré-empilhamento é a 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 ("split-step"), 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" na migração de dados ordenados em afastamento e ponto médio usando a equação de raiz quadrada dupla (DSR), Yilmaz (2000). Pestana et al. (1997) aplicaram o método de Popovici (1996) para a 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) também testou diferentes técnicas de correção de fase em duas etapas, para dados ordenados em famílias de parâmetro 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.

MÉTODOS TIPO "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 extrapolação "split-step", usado para a migração pré-empilhamento de famílias de tiro comum, pode ser expresso como (Aldunate, 2002; Ji, 1995):

$$W = e^{i p_1 \Delta z} F^{-1} e^{i p_2 \Delta z}, \quad (1)$$

onde as fases

$$p_1 = \omega \delta u(x, z) \quad \text{e} \quad p_2 = k_z \left(k_z = \sqrt{\bar{u}^2 \omega^2 - k_x^2} \right)$$

são aplicadas 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 inversa de Fourier espacial, para aplicar o segundo deslocamento de fase com p_1 , que visa corrigir a variação lateral de velocidade.

Método "Split-Step" Simultâneo (SS-S)

No método SS-S a propagação dos campos de ondas é executado pelo operador de propagação unidirecional "split-step" (Equação 1). Os campos de ondas das fontes e receptores são propagados separadamente, de forma que o campo de ondas gerado pela fonte é propagado a partir da superfície de registro e o campo de ondas dos receptores é depropagado (propagação reversa no tempo), também a partir da mesma superfície. Para descrever esse processo, introduzimos a seguinte notação matricial, a qual nos permitirá observar mais claramente a forma como agem os operadores de extrapolação (Figura 1). Começamos desde o registro sísmico dos tiros na superfície z_0 (Berkhout, 1982):

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

onde a matriz $F(z_0, z_0)$ representa a função de transferência. Nela temos representados a matriz refletividade R e o operador de propagação W , para um componente de frequência do experimento sísmico.

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

Na equação (2) tem-se o vetor tiro $s_j(z_0)$ e o vetor medido $g_j(z_0)$ (dados registrados nos receptores), referindo-se a um experimento sísmico na superfície $z = z_0$, com a fonte na posição $x = x_j$. A equação (3) mostra os operadores de propagação $W(z_n, z_0)$ e $W(z_0, z_n)$, aqui do tipo "split-step", que quantificam todos os efeitos da propagação (descendente e ascendente, respectivamente) entre os níveis de profundidade z_0 e z_n , e $R(z_n)$ é a matriz refletividade para cada nível de profundidade z_n .

Na migração pré-empilhamento, a extrapolação dos campos de ondas da fonte [$s(z_n)$] e dos receptores [$g(z_n)$] é recursiva

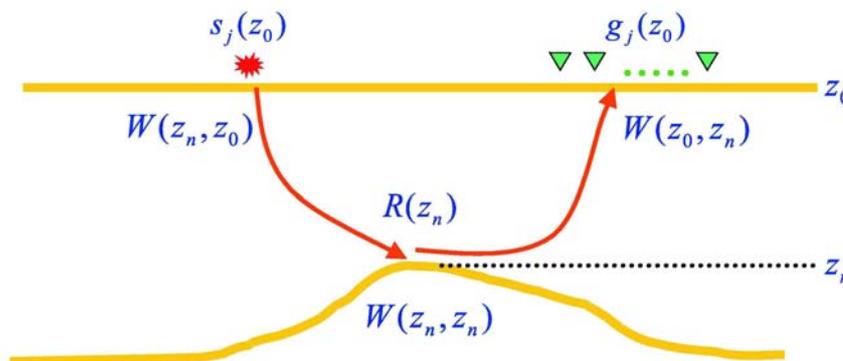


Figura 1 – Modelagem direta mostrando a aplicação dos operadores de extrapolação entre os níveis z_0 e z_n .
Figure 1 – Forward modelling showing the application of the extrapolation operators between levels z_0 and z_n .

para cada nível de profundidade z_n :

$$s(z_n) = W(z_n, z_m)s(z_m), \tag{4}$$

e

$$g(z_n) = W^*(z_n, z_m)s(z_m), \tag{5}$$

onde $*$ denota o adjunto e implica que o campo de ondas ascendentes (registrado nos receptores) é extrapolado reversamente no tempo (propagação reversa no tempo), e o campo de ondas descendentes (gerado pela fonte) é extrapolado diretamente, ou seja, é feita a sua propagação para baixo a partir da fonte.

A partir da equação (2) e utilizando as equações (4) e (5), obtemos:

$$g(z_n) = W^*(z_n, z_0)W(z_0, z_n)R(z_n)W(z_n, z_0)s(z_0), \tag{6}$$

e além disso, assumimos que o operador de extrapolação “split-step” W é pseudo-unitário (Aldunate, 2002; Ji, 2001) então a equação (6) se reduz a

$$g(z_n) = R(z_n)s(z_n). \tag{7}$$

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, para seções de 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:

$$r(x, z_n) = \sum_{\omega} \frac{g(x, z_n, \omega)s^*(x, z_n, \omega)}{s(x, z_n, \omega)s^*(x, z_n, \omega) + \epsilon^2}, \tag{8}$$

onde ϵ representa um valor pequeno introduzido para estabilizar a divisão. Pelo fato de estarmos usando na simulação do tiro uma fonte tipo delta de Dirac, o denominador da equação (8) se reduz à unidade e, assim, a refletividade é recuperada simplesmente pela correlação dos campos, ou seja:

$$r(x, z_n) = \sum_{\omega} g(x, z_n, \omega)s^*(x, z_n, \omega), \tag{9}$$

e a imagem final migrada é obtida somando-se todas as freqüências e assim obtém-se a função refletividade. O esquema mostrado na Figura 2, representa o processo de migração descrito acima.

Método “Split-Step” Híbrido (SS-H)

Já o método SS-H caracteriza-se por correlacionar dois campos de ondas, onde os tempos de cada campo são calculados de forma distinta e separadamente (Aldunate, 2002; Jiao, 2001). 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 iconal, tal como se faz na migração Kirchhoff (Schneider, 1978; Akbar, Sen & Stoffa, 1996), que considera os tempos das primeiras chegadas, por serem as mais simples e mais rápidas e, portanto, assumindo que a primeira chegada é o evento que contém a principal contribuição do campo incidente.

Usando o princípio de imagem da migração pré-empilhamento, correlacionamos ambos os campos (Figura 3):

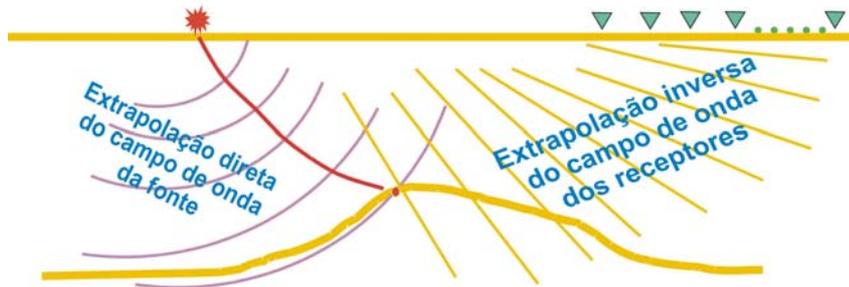


Figura 2 – Esquema mostrando a extrapolação dos campos de ondas na migração de tiro comum. Em cada profundidade e para cada frequência os campos são correlacionados e onde eles são coincidentes uma imagem é formada.

Figure 2 – Scheme showing the wavefields extrapolation in the common shot migration method. At each depth and for each frequency these two wavefields are cross-correlated and wherever the wave fields coincide an image is constructed.

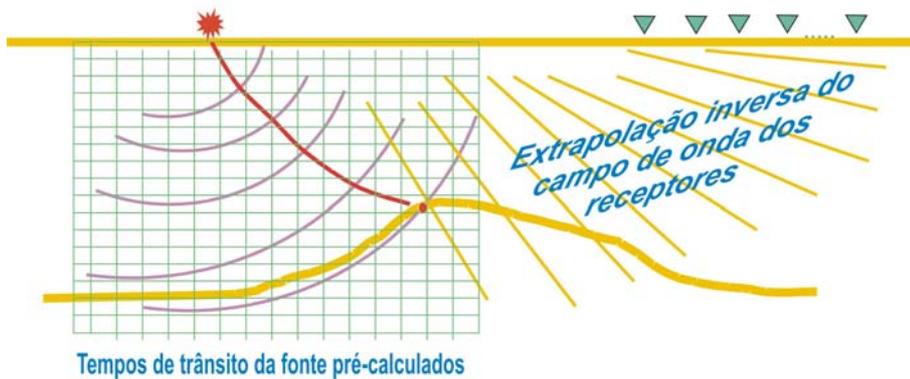


Figura 3 – Extrapolação reversa do campo de onda dos receptores e os tempos de trânsito da fonte pré-computados para cada ponto do modelo. Os tempos são usados pelo método SS-H na aplicação da condição de imagem.

Figure 3 – Reverse extrapolation of the receiver wavefield and source traveltimetable precomputed for each depth point in the model. The traveltimes are used by the SS-H method for the image condition application.

o campo de ondas da fonte (tempos de trânsito calculados com a equação iconal) e o campo de ondas dos receptores, extrapolados com o operador "split-step". Desta forma, a imagem é construída através da correlação destes campos,

$$I(x, z) = \sum_{\text{tiros}} \sum_{\omega} [e^{i\omega t_s(x,z)}] \cdot P_r(x, z, \omega), \quad (10)$$

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 os tempos de percurso fornecidos pelas tabelas de tempo e, assim, os refletores são reconstruídos em profundidade, ou seja, nos pontos onde o tempo de chegada da onda direta for coincidente como o tempo da onda ascendente.

Método "Phase Shift Plus Interpolation – Split-Step" (PSPI-SS)

Experimentamos também a combinação dos métodos SS-S e PSPI (PSPI-SS), com a finalidade de melhorar mais a reconstituição dos refletores em profundidade. Diferentemente do método SS-S, que usa apenas a velocidade média em cada passo de profundidade, usamos várias velocidades de referência. E, como no método SS-S, aplicamos a correção "split-step" para cada velocidade selecionada. Assim, o campo de onda em cada profundidade foi obtido interpolando-se os campos de referência, baseando-se na relação entre a velocidade verdadeira local e as velocidades de referência. O sucesso deste método depende diretamente do número de velocidades de referência e, portanto, resultará em um procedimento de extrapolação mais preciso,

porém, a um custo computacional bem maior dos que os métodos discutidos anteriormente.

Este método pode ser formulado da seguinte maneira: o campo de onda em cada profundidade é copiado e extrapolado para as N velocidades de referência. Então, os N campos de ondas são extrapolados; primeiro, aplica-se o operador de deslocamento de fase ($e^{ip_2 \Delta z}$) usando-se as várias velocidades de referência; segundo, logo após a transformada de Fourier espacial, efetua-se o segundo deslocamento de fase, que visa corrigir a variação lateral de velocidade, através do operador de deslocamento de fase $e^{ip_1 \Delta z}$. Em seguida, o operador de interpolação ζ combina os N campos resultantes de referência $P_{ref}^n(x, z)$ através de uma soma ponderada no espaço, de acordo com a velocidade verdadeira v . Assim, o campo de onda resultante é dado por:

$$P(x, z) = \sum_{n=1}^N \alpha^n P_{ref}^n(x, z), \quad (11)$$

onde,

$$\alpha^n = \frac{v_{ref}^{n+1} - v}{v_{ref}^{n+1} - v_{ref}^n} \quad \text{e} \quad \alpha^{n+1} = \frac{v - v_{ref}^n}{v_{ref}^{n+1} - v_{ref}^n}, \quad (12)$$

para

$$v_{ref}^n \leq v \leq v_{ref}^{n+1}.$$

O operador de propagação PSPI-SS é simbolicamente representado por:

$$W^{pspi-ss} = \zeta_N \cdot e^{ip_1^n \Delta z} \cdot F^{-1} \cdot e^{ip_2^n \Delta z} \cdot C_N \cdot F, \quad (13)$$

onde C_N representa as n -cópias do campo de ondas, F e F^{-1} representam, respectivamente, as transformadas direta e inversa de Fourier e o sobrescrito n indica que a transformada de Fourier e o operador "split-step" são aplicados N vezes.

Como na técnica SS-S (Figura 2), a imagem sísmica é obtida correlacionando-se ambos os campos de ondas, equação (9), extrapolados com o operador descrito pela equação (13).

RESULTADOS NUMÉRICOS

Aplicamos as três técnicas de migração descritas acima aos dados sísmicos pré-empilhados ordenados em famílias de ponto de tiro comum gerados a partir dos modelos Marmousi e domo de sal SEG-EAGE.

O dado sintético Marmousi, que se converteu num teste bastante popular 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 4. O modelo de pseudo-refletividade, que é calculada derivando-se o campo de velocidades nas direções vertical e horizontal (Han, 2000), é mostrado na Figura 5, onde os refletores fortes correspondem ao maior contraste de velocidade presente na seção. O resultado da migração será comparado com esta seção de pseudo-refletividade. Um total de 240 famílias de tiros foram geradas e a seção de afastamento mais próximo é mostrada na Figura 6, com um espaçamento entre tiros de 25 m. Os tiros foram dados a partir de 3 km indo até 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. Cada traço com 750 amostras a 4 ms de intervalo, resultando em 3 s de registro. Os parâmetros usados na migração são apresentados na Tabela 1.

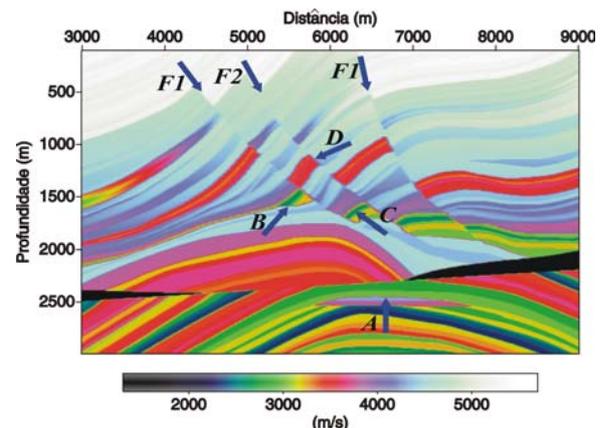


Figura 4 – Campo de velocidades do modelo Marmousi.

Figure 4 – Marmouse velocity model.

Os principais alvos da migração são as regiões indicadas com as setas A, B, C e D na Figura 4, apontando reservatórios de hidrocarbonetos. Sob as falhas os campos de onda são distorcidos, criando efeitos complexos na sua propagação. Na parte central do 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 7 é o resultado da migração SS-S, nela observa-se uma boa continuidade lateral, coerência nos refletores e o alvo A é facilmente identificável. As falhas F1, F2 e F3 apresentam uma boa definição. 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-800 Hz, 2 GB de memória, o tempo de execução neste modelo foi de apro-

ximadamente 4 horas. Já a técnica SS-H levou 3 horas de processamento, apresentando um bom desempenho computacional. Mas, como se observa na Figura 8, os refletores reconstituídos ao redor das três falhas não estão bem focalizados e a zona embaixo delas não aparece bem imageada. Ainda verificamos que o alvo A é pobremente visualizado, contudo os refletores horizontais, nas partes laterais do modelo, foram bem imageados. Com um custo computacional de quase 8h de máquina, a técnica PSPI-SS apresenta o melhor resultado (Figura 9), sendo superior ao SS-S pela melhor focalização de várias 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 reconstituído de forma excelente, demonstrando que entre os métodos testados ele foi o que melhor imageou os dados Marmousi.

Tabela 1 – Parâmetros de migração usados para o modelo Marmousi.

Table 1 – Migration parameters for the Marmousi model.

Número de tiros	230
Intervalo de tiro (m)	25
Intervalo de receptores (m)	25
Número de canais	96
Número de amostra/traço	750
Amostragem em tempo (s)	0,004
Tempo de registro (s)	3
Afastamento mínimo (m)	-200
Afastamento máximo (m)	-2575
Amostragem em profundidade (m)	8
Profundidade máxima (m)	3000
Freq. mínima – Freq. máxima (Hz)	50 – 60

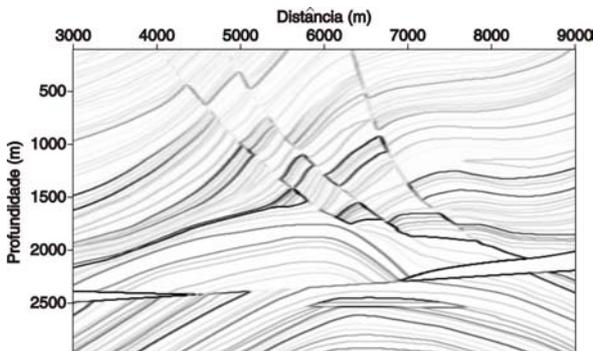


Figura 5 – Seção de pseudo-refletividade do modelo Marmousi.

Figure 5 – Pseudo-reflectivity section for the Marmousi model.

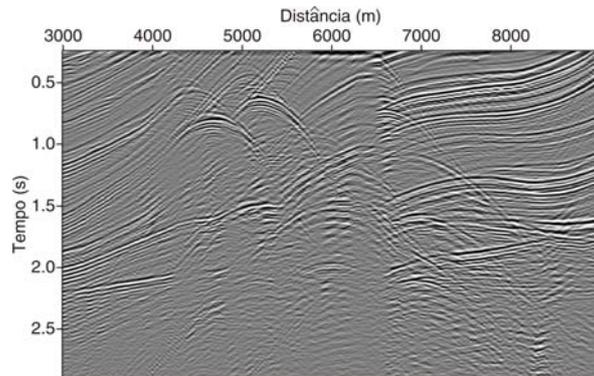


Figura 6 – Seção de afastamento mais próximo (seção de afastamento de 200 m) dos dados do modelo Marmousi.

Figure 6 – Near offset section (offset equal to 200 m) of the dataset for the Marmousi model.

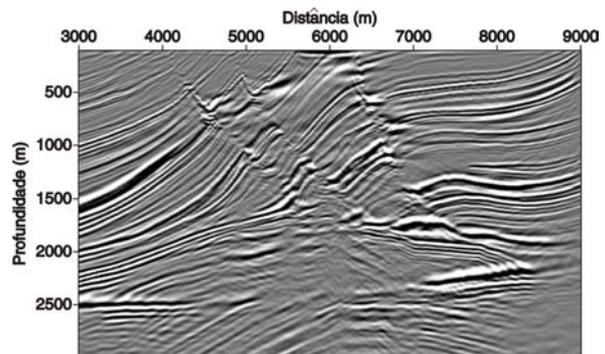


Figura 7 – Resultado da migração com o método SS-S obtido com os dados do modelo Marmousi.

Figure 7 – Migration result of Marmousi dataset using the SS-S method.

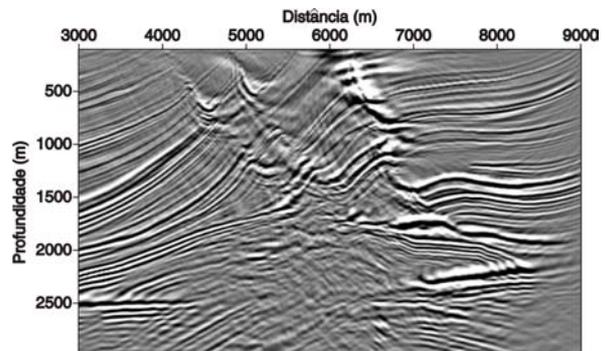


Figura 8 – Resultado da migração com o método SS-H obtido com os dados do modelo Marmousi.

Figure 8 – Migration result using the SS-H method for the Marmousi dataset.

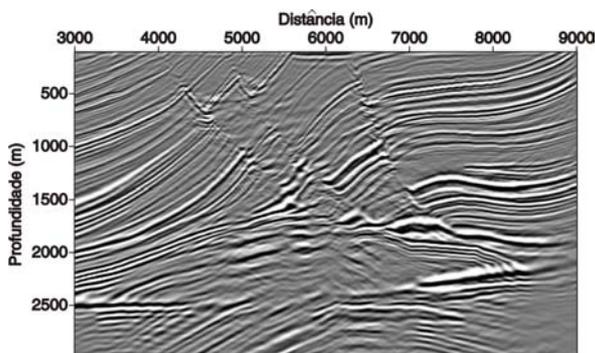


Figura 9 – Resultado da migração dos dados do modelo Marmousi com o método PSPI-SS.

Figure 9 – Migration result for the Marmousi dataset with the PSPI-SS method.

Tabela 2 – Parâmetros de migração usados para o modelo SEG-EAGE.

Table 2 – Migration parameters for the SEG-EAGE model.

Número de tiros	325
Intervalo de tiro (m)	48,76
Intervalo de receptores (m)	24,38
Número de canais	176
Número de amostra/traço	626
Amostragem em tempo (s)	0,008
Tempo de registro (s)	5
Afastamento mínimo (m)	0
Afastamento máximo (m)	-4267,20
Amostragem em profundidade (m)	24,38
Profundidade máxima (m)	3657,60
Freq. mínima – Freq. máxima (Hz)	5 – 40

O dado sintético SEG-EAGE consiste de 325 famílias de tiros. Para cada tiro tem-se 176 receptores com um espaçamento de 24,38 m, com afastamento máximo de 4291,58 m (receptores à esquerda dos tiros). O intervalo de tiro é de 48,76 m. O intervalo de amostragem é de 8 ms, com 626 amostras por traço. Os demais parâmetros de migração são apresentados na Tabela 2. O modelo de velocidades 2-D é mostrado na Figura 10. 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 que são razoavelmente nítidas. No modelo de pseudo-refletividade, usado para comparação dos resultados e mostrado na Figura 11, o forte contraste de velocidade é destacado pela forte amplitude dos refletores que delineiam o corpo de sal. A forma irregular do corpo e o alto contraste de velocidade causam

problemas na visualização sísmica dos dados, como se nota na Figura 12, que mostra a seção de afastamento nulo. Os resultados das migrações SS-S e SS-H são mostradas nas Figuras 13 e 14, 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, já 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 apresentou a mesma continuidade como no método SS-H. Já os outros refletores que delineiam o corpo de sal foram bem reconstituídos pelo método SS-S.

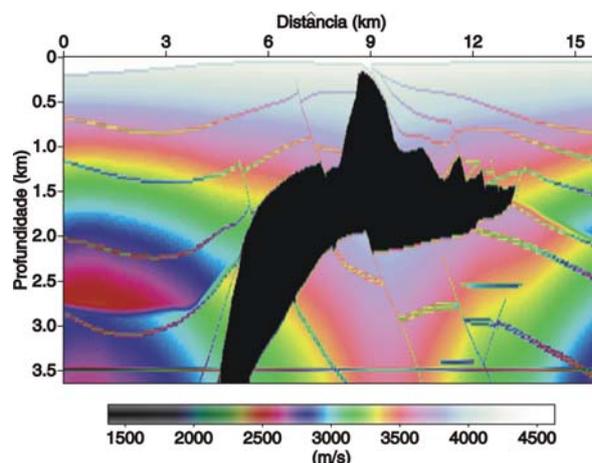


Figura 10 – Campo de velocidades do modelo SEG-EAGE.

Figure 10 – SEG-EAGE velocity model.

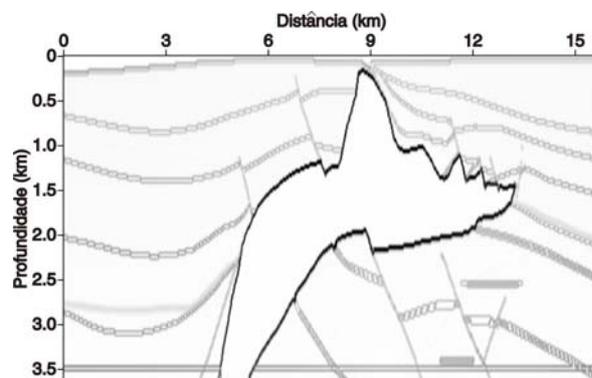


Figura 11 – Seção de pseudo-refletividade do modelo SEG-EAGE.

Figure 11 – Pseudo-refletivity section for the SEG-EAGE model.

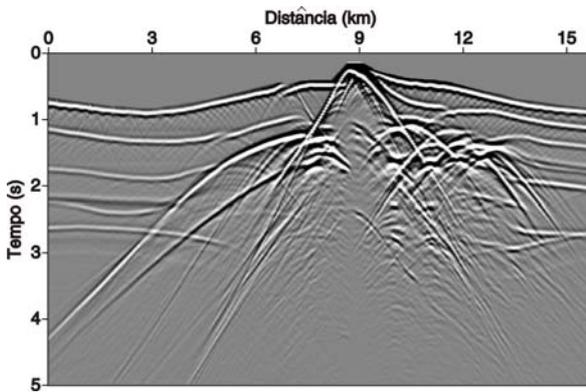


Figura 12 – Seção de afastamento zero dos dados do modelo SEG-EAGE.

Figure 12 – Zero offset section of the SEG-EAGE dataset.

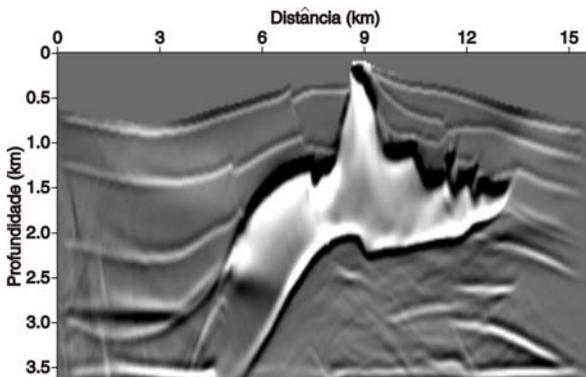


Figura 13 – Resultado da migração com o método SS-S para os dados do modelo SEG-EAGE.

Figure 13 – Migration result for the SEG-EAGE dataset obtained with the SS-S method.

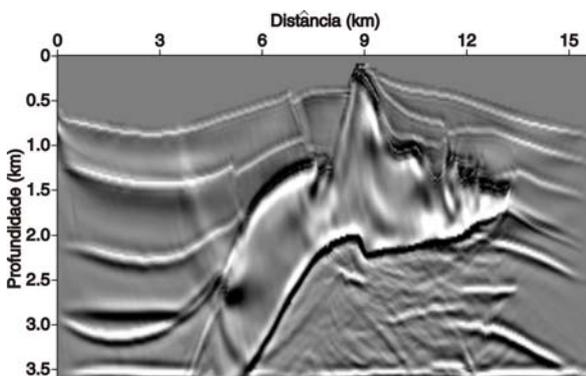


Figura 14 – Resultado da migração com o método SS-H obtido com os dados do modelo SEG-EAGE.

Figure 14 – Migration result for the SEG-EAGE dataset obtained with the SS-H method.

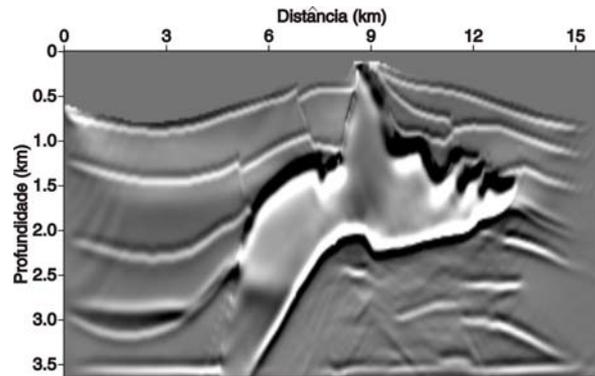


Figura 15 – Resultado da migração dos dados SEG-EAGE obtido com o método PSPI-SS.

Figure 15 – Migration result for the SEG-EAGE dataset obtained with the PSPI-SS method.

Quanto ao método de migração PSPI-SS, verificamos através do resultado da migração para os dados SEG-EAGE, que este método também apresenta uma imagem de melhor qualidade que os demais métodos, Figura 15. 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

Três métodos de migração sísmica 2D pré-empilhamento em profundidade usando operadores de extrapolação "split-step" foram testados nos dados sintéticos Marmousi e SEG-EAGE, os quais representam situações realísticas de alta complexidade geológica. Os resultados numéricos apresentados pelos métodos PSPI-SS e SS-S forneceram imagens migradas de alta qualidade, atestando a capacidade desses métodos baseados em extrapoladores do tipo "split-step", para o 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 PSPI-SS 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 apresen-

tados aqui, mesmo em modelos de forte variação lateral, apresentaram resultados satisfatórios.

Quanto ao método SS-H, creditamos a baixa qualidade dos resultados ao fato de utilizar no imageamento os tempos de percurso apenas das primeiras chegadas. Por outro lado, os métodos SS-S e PSPI-SS utilizam durante o processo de imageamento um campo de ondas com todas as possíveis chegadas em cada ponto de imagem do modelo em profundidade. Assim, possibilitando resultados de boa qualidade, porém, a um custo bastante alto, quando comparado com o tempo de processamento exigido pelo método SS-H.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANP (Agência Nacional do 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

- AKBAR E, SEN K & STOFFA L. 1996. Prestack plane-wave Kirchhoff migration in laterally media, *Geophysics*, 61: 1068–1079.
- ALDUNATE PGC. 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 RML. 1988. Migração Por Mudança de Fase em Duas Etapas, Tese de doutorado, PPPG/UFBA, Salvador, Bahia.
- GRAY SH, 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.

Jl J. 1995. *Sequential seismic inversion using plane wave synthesis*, Ph.D thesis in geophysics, Seismic Exploration Project (SEP-90) – Stanford University.

Jl J. 2001. *Angle-dependent reflectivity recovery by plane-wave 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.Ds thesis geophysics, University of Texas.

LOGRADO JCG. 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 RC & COSTA MS. 1997. Migração em duas etapas de dados ordenados em offset comum, In: *5th Int. Cong. Bras. Geofísica, Expanded Abstracts*, pp. 163–166, SBGf.

PESTANA RC, STOFFA PL & SANTOS JR SB. 2000. *Plane wave prestack time migration*, In: *SEG 70th Annual Meeting*, pp. 810–813.

POPOVICI MA. 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 PL, FOKKEMA JT, FREIRE RML & KESSINGER WP. 1990. *Split-Step Fourier migration*, *Geophysics*, 55: 410–421.

YILMAZ O. 2000. *Seismic Data Processing*, SEG, Tulsa, Oklahoma.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Gary C. Aldunate é graduado em Física (UATF-BO/1997), Mestre em Geofísica de Exploração de Petróleo (UFBA/2002) e atualmente é aluno do curso de Doutorado em Geofísica da Universidade Federal da Bahia. As suas principais áreas de interesse são modelagem e processamento de dados sísmicos com ênfase em migração de dados sísmicos.

Reynam C. Pestana é graduado em Física (UFBA/1983) e Doutor em Geofísica pela UFBA, 1988. Pós-doutorado em Geofísica no Instituto de Geofísica da Universidade de Karlsruhe (Alemanha), 1989–1991, e de 1998–1999 no Instituto de Geofísica da Universidade do Texas em Austin. De 1988 até o presente é pesquisador do CPGG/UFBA, atuando no Grupo de Geofísica de Exploração de Petróleo. Desde 1992 é Professor Adjunto do Departamento de Geofísica Nuclear do Instituto de Física e da Pós-graduação em Geofísica da UFBA. Tem atuado no desenvolvimento de métodos e algoritmos de processamento e imageamento sísmicos. Mais recentemente suas pesquisas envolvem técnicas de migração de dados sísmicos decompostos em ondas planas. É membro da SBGf e da SEG.

Paul L. Stoffa, graduado em física pelo Rensselaer Polytechnic Institute (1970) e Ph.D., pela Columbia University (1974). Diretor do Instituto em Geofísica da Universidade do Texas em Austin (UTIG), desde 1994. Suas áreas de interesse são aquisição sísmica multicanal, processamento de sinais, propagação de ondas acústicas e elásticas, modelagem e inversão de dados geofísicos. Também se interessa em computação paralela para desenvolver novos métodos de aquisição e processamento de dados sísmicos, que possam ser usados em problemas presentes em áreas geologicamente complexas.