



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

MIGRAÇÃO DE DADOS SÍSMICOS 2D PRÉ-EMPILHAMENTO USANDO OPERADORES DE EXTRAPOLAÇÃO “SPLIT-STEP”

Gary Corey Aldunate P., Reynam da Cruz Pestana

Universidade Federal da Bahia, Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia
Rua Barão de Geremoabo, s/n, sala 315-C, Campi da Ondina, Salvador-BA,
CEP 40170-115, telf: +55 (71) 203 8537, e-mail: gcap@cpgg.ufba.br,
reynam@cpgg.ufba.br

Resumo – Um método de migração sísmica pré-empilhamento é desenvolvido e testado para dados sísmicos 2D ordenados em famílias de ponto de tiro comum. A migração é realizada simultaneamente para as fontes e receptores usando-se operadores do tipo “split-step”. Os dados registrados nos receptores são depropagados em profundidade, e os campos de onda da fonte é propagada; esta simulação é feita usando-se operadores “split-step”. A imagem final 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 pela soma de todos os tiros migrados. A técnica de migração “split-step” é de fácil implementação e também bastante robusta em situações de forte contraste lateral de velocidade.

O método foi testado no modelo Marmousi e também em dado real de uma linha sísmica 2D da Carolina do Norte, apresentando resultados bastante satisfatórios.

Abstract – A prestack depth migration method is developed and tested for seismic data organized in common shot gathers. The migration is carried out simultaneously for the sources and receivers using split-step operators. The receiver data is depropagated in depth and the sources wavefields is propagated both using split-step operators. The final depth image is obtained by adding all the interest frequencies, during the process of correlation of the propagated and depropagated fields, for each depth level and also summing all the migrated shots. The split-step migration technique is of easy implementation and also is sufficiently robust in situations of strong lateral velocity contrast.

The method was tested in the Marmousi model and also in a real data of North Carolina 2D seismic line, the method had been results sufficiently satisfactory.

1. 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, etc., demandam uma boa qualidade das seções sísmicas obtidas através do processamento sísmico. Para áreas geologicamente complexas a migração pré-empilhamento é precisa, 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. (1998, 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. Poquechoque (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 variação lateral de velocidade.

2. Migração pré-empilhamento “split-step”

A migração “split-step” Stoffa (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: $v(x, z) = \bar{v}(z) + \mathbf{d}v(x, z)$. O operador de migração “split-step” pré-empilhamento para migrar famílias de tiro comum, pode ser expressa como (Poquechoque, 2002; Ji, 1995):

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

onde os deslocamentos de fase são, $p_1 = \mathbf{w}d\mathbf{l}(x, z)$ e $p_2 = k_z$ (onde $k_z = \sqrt{\bar{u}^2 \mathbf{w}^2 - k_x^2}$), que trabalham nos domínios (x, \mathbf{w}) e (k, \mathbf{w}) , respectivamente. O termo de perturbação da vagarosidade é definido como $d\mathbf{l}(x, z) = 1/\mathbf{d}v(x, z)$ e a transformada de Fourier inversa 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.

2.1. Método de migração “split-step” simultânea (SS-S)

Neste método de migração 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, em efeito 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 este processo introduzimos a notação matricial, o qual nos permitirá observar mais claramente a forma em que agem os operadores de extrapolação e algumas de suas propriedades. Começamos desde o registro sísmico dos tiros na superfície z_n (Poquechoque, 2002; Berkhout, 1982; Ji, 2001):

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

onde $F(z_0, z_0)$ é o operador avante, função associada ao registro sísmico que agrupa a refletividade R e os operadores de propagação tipo “split-step” W , da 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 o vetor do tiro $s_j(z_0)$ e o vetor medido $g_j(z_0)$ (correspondente aos receptores) referem-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, o primeiro passo é a extrapolação dos campos de onda da fonte [$s(z_n)$] e do receptor [$g(z_n)$] recursivamente, 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 onda ascendente (registrado pelos receptores) é extrapolado reversamente no tempo (depropagado); e o campo das ondas descendentes (geradas pelas fontes) é extrapolado diretamente também no tempo (propagado). Substituindo-se as duas últimas Equações 4 e 10 na Equação 2, obtemos:

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

assumimos que o operador de extrapolação W é pseudo-unitário (poquechoque, 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, é obtida deconvolvendo-se o campo de onda descendente com o campo de onda ascendente no domínio espaço-frequência (x, \mathbf{w}) tem a forma:

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

onde \mathbf{e} representa um valor positivo pequeno introduzido para estabilizar a divisão. A imagem é obtida somando-se sobre todas as frequências para extrair a componente da refletividade no tempo zero. A implementação do algoritmo pré-empilhamento em profundidade SS-S é mostrada no fluxograma da Figura 1.

3. Aplicação do algoritmo SS-S

O algoritmo de migração pré-empilhamento em profundidade SS-S descrito anteriormente, foi testado no dado sintético Marmousi e em um dado real 2-D da Carolina.

3.1. Dado sintético Marmousi

O dado sintético Marmousi converteu-se num popular examinador de algoritmos de migração, é um dado acústico 2-D 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 2a. O modelo de pseudo-refletividade é mostrado na Figura 2b, calculada a partir do modelo de velocidades Figura 4, 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 como a derivada da velocidade nas direções vertical e horizontal (Han, 2000). Um total de 240 famílias de tiros foram geradas, a seção do afastamento nulo é mostrada na Figura 2c, 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 têm-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 2b, 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 2d, é o resultado da migração SS-S; 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 excelente qualidade, o que demonstra a eficiência do método SS-S, na presença da alta complexidade estrutural como a do modelo Marmousi.

O tempo de execução neste modelo foi de aproximadamente 4 horas.

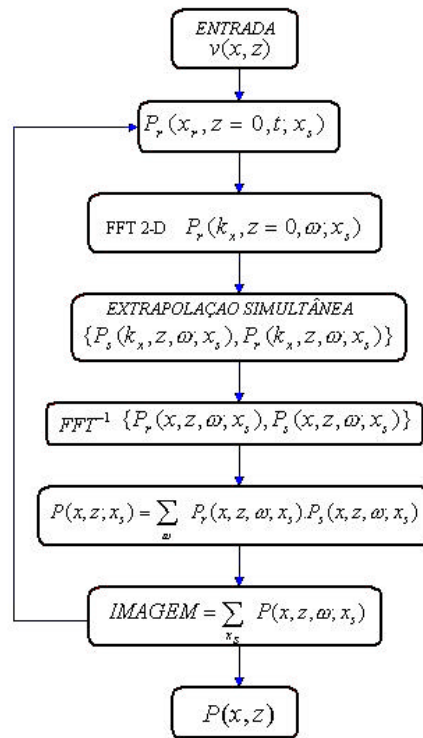


Figura 1. Algoritmo SS-S.

3.2 Dado da Carolina

O dado da Carolina é uma aquisição sísmica marítima 2D. Possui 596 estações de tiro, uniformemente distribuídas ao longo da superfície livre, com um intervalo de 25 m, e 240 receptores foram dispostos num arranjo “end-on”, separados de 50 m. O comprimento do registro é de 2250 amostras com um intervalo de amostragem temporal de 4 ms, totalizando 9 s. O modelo de velocidade utilizado foi estimado a partir de um processo de migração e análise de velocidades Jiao (2001), e é representado por uma malha de 600x900 pontos, com um espaçamento horizontal de 50 m e um espaçamento vertical de 10 m, como mostrado na Figura 3a. A linha sísmica possui 30 km de extensão. A área geológica começa num talude de baixa declividade (parte direita) concluindo no fundo oceânico (parte esquerda), Jiao (2001). Para testar o método de migração selecionamos apenas 5,5 s, ou seja, utilizamos somente 1375 amostras no tempo. A seção de afastamento nulo deste dado é mostrado na Figura 3b.

No resultado da migração SS-S, Figura 4, observa-se as interfaces claramente delineadas, apresenta continuidade e coerência nos refletores e fornece uma seção sobre a qual pode-se ainda fazer alguma interpretação estrutural.

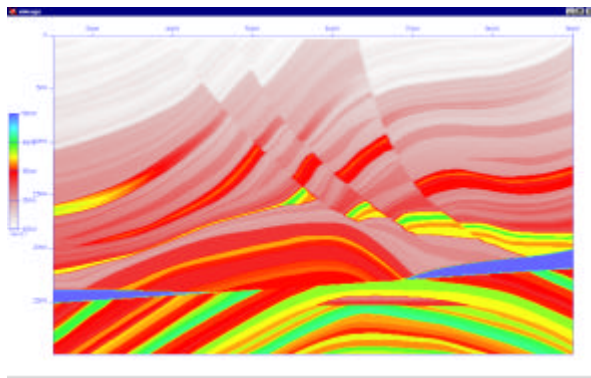
Quanto ao desempenho computacional verificou-se que o método SS-S leva aproximadamente 9,5 dias na máquina Pentium IV com 1 Gb de memória, rodando com outros processos ao mesmo tempo.

4. Conclusões

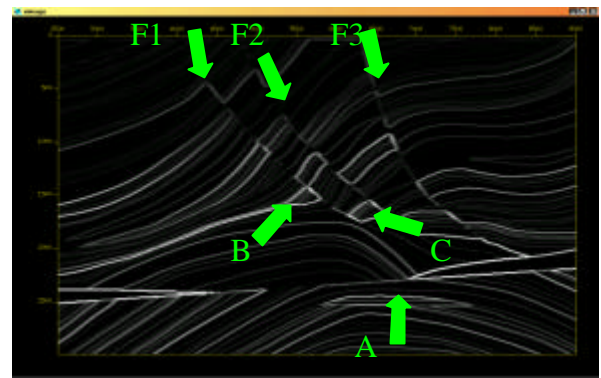
Foi aplicado com sucesso, tanto em dados sintético e real, o método de migração pré-empilhamento em profundidade SS-S, usando-se operadores de extrapolação do tipo “split-step” para dados sísmicos ordenados em seções de tiro comum.

O método foi testado no dado sintético Marmousi por representar situações realísticas de alta complexidade geológica. Os resultados numéricos apresentados pelo método SS-S mostra uma imagen migrada de alta qualidade, atestando a capacidade do método implementado em imagear estruturas complexas com forte contraste lateral de velocidade associados a fortes mergulhos.

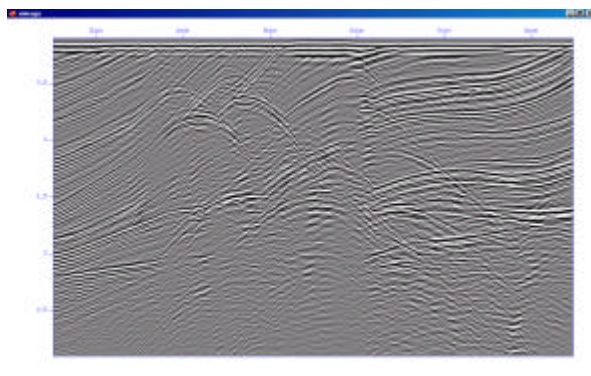
O bom desempenho do algoritmo deve-se ao fato deste método de migração ser implementada num conjunto de dados de tiro comum e por conseguinte, a utilização de diferentes partes do campo de velocidade (região compreendida pelo tiro e os receptores), durante o processo de imageamento. Entre as grandes vantagens do método SS-S podemos destacar a sua implementação bastante simples através de operadores “split-step”, teoricamente válidos até 5 graus em regiões de variação lateral de velocidade, mas como verificamos através dos exemplos numéricos apresentados aqui, com modelos de forte variação lateral, o método apresentou resultados excelentes. Além do que, durante o processo de migração das fontes e receptores, o método leva em consideração todas as possíveis chegadas em cada ponto da imagem do modelo em profundidade.



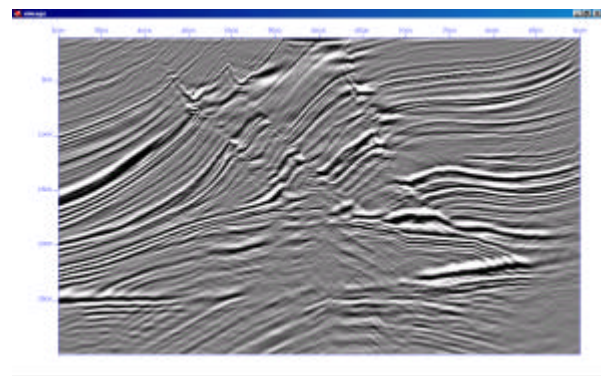
(a)



(b)

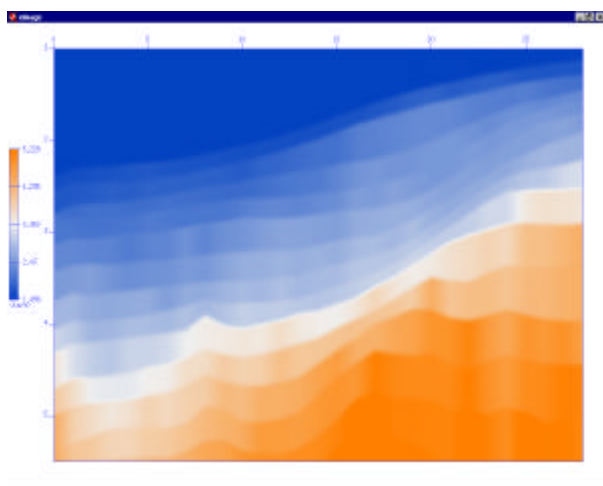


(c)

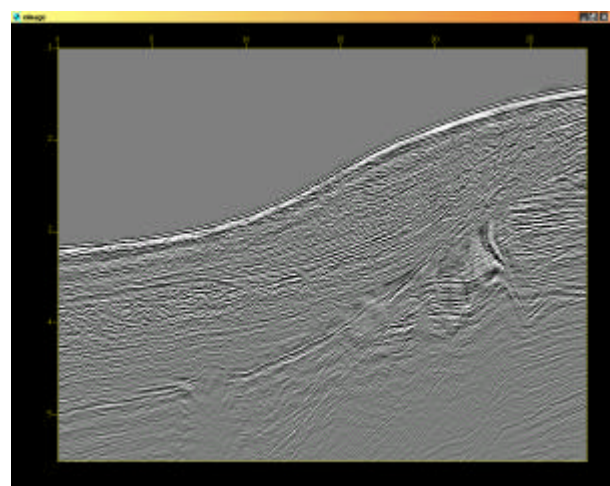


(d)

Figura 2. (a) Campo de velocidades do modelo Marmousi, (b) Pseudo-refletividade, os refletores mais intensos correspondem a fortes contrastes de velocidades; (c) Seção de afastamento nulo; (d) Resultado da migração SS-S.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Campo de velocidades do dado Carolina; (b) Seção de afastamento nulo do dado Carolina.

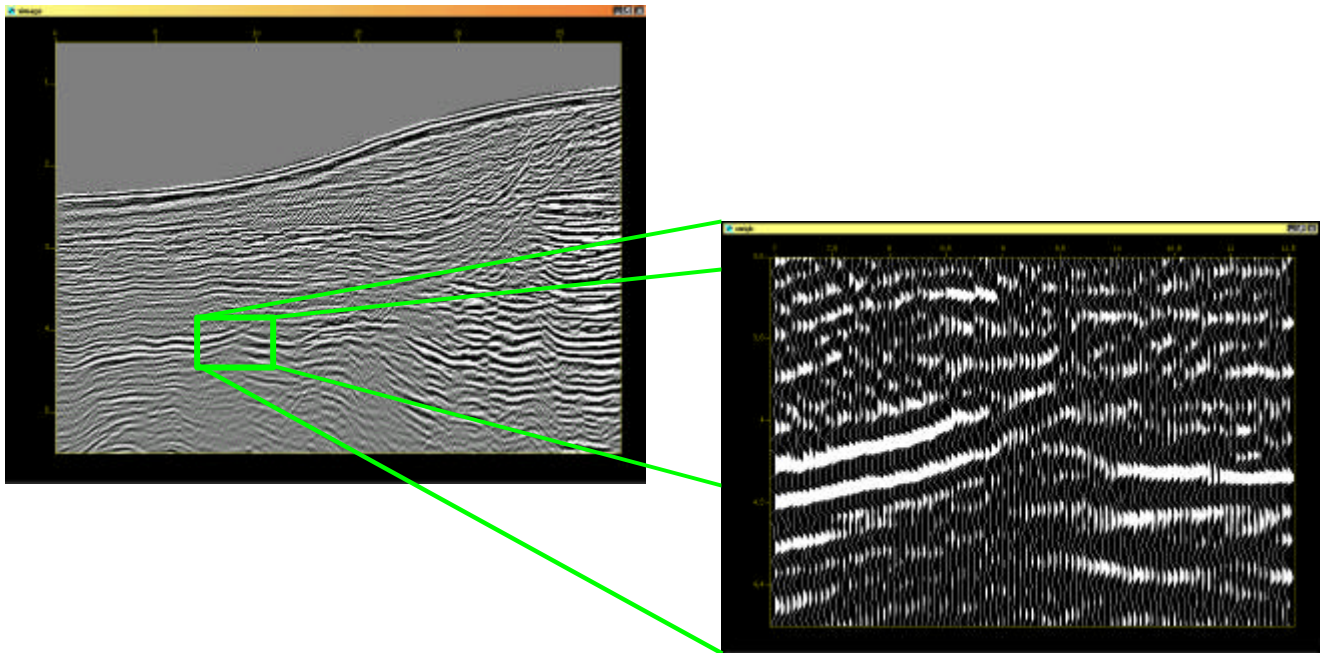


Figura 4. Resultado da Migração SS-S do dado Carolina e a ampliação da região em destaque.

8. Agradecimentos

À ANP (Agencia Nacional de Petróleo). Aos professores e colegas do CPGG/UFBA.

9. Referências

- 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.
- Jl, J. (1995). Sequential seismic inversion using plane-wave synthesis, *Ph.d's thesis geophysics*, Stanford University.
- Jl, 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. e VICENTINI, A. (1998). Traveltime calculation by band limited plane-waves, In: *SEG 68th Annual Meeting*.
- 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.
- 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.