



Migração Kirchhoff 2-D pós-empilhamento otimizada através do método dos mínimos quadrados

Peterson Nogueira Santos*, Reynam C. Pestana CPGG/UFBA, Gary C. Aldunate, CPGG/UFBA, Adriano W. G. dos Santos, CPGG/UFBA/INCT-GP/CNPq.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do 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

This work applies and discusses the least-squares migration (LSM) procedure to improve the imaging quality of depth seismic sections. Here we used the least-squares approach based on Kirchhoff operators for migration and modeling. The least-squares migration solution is obtained using the iterative gradient method and the method is then applied to 2D zero-offset synthetic dataset with a complex structure in order to assess the image quality obtained by LSQM. To migrate and demigrate the seismic datasets, we applied the Kirchhoff migration and demigration algorithms available on the Seismic Unix (SU) package. We tested the LSM approach for the SEG-EAGE seismic model, which has a complex salt body, and showed how the imaging quality below the salt body can be improved. Despite of the limitations of the Kirchhoff migration method when imaging complex structures, results with an improvement in quality of the final depth migrated image in comparison with the conventional Kirchhoff migration results were obtained. The LSM results show a better continuity of the seismic reflectors and a considerable attenuation of migration artifacts as well.

Introdução

A migração sísmica é uma das principais etapas do processamento sísmico. Ela tem como principais objetivos posicionar os refletores em suas verdadeiras posições e colapsar as energias das difrações (Yilmaz, 2001). Existem diversos métodos de migração. Entretanto, a migração Kirchhoff, devido ao seu baixo custo computacional, será empregada neste trabalho com o objetivo de testar a eficácia do método de migração baseado em um procedimento de otimização do tipo mínimos quadrados (MQ). Através desse método, espera-se mostrar que podemos obter imagens migradas de melhor qualidade do que aquelas obtidas através do método de migração Kirchhoff convencional.

Schuster (1993) e Nemeth et al. (1999) aplicaram o método dos mínimos quadrados para otimizar o procedimento de migração.

Ambos mostraram em seus estudos que a migração sísmica, baseada em um procedimento do tipo mínimos quadrados, pode visivelmente reduzir os artefatos de migração e melhorar a resolução sísmica, bem como produzir uma compensação de iluminação, ou seja, apresentar uma melhor correção de amplitude dos refletores mais profundos. Nesses trabalhos eles empregaram os operadores de migração e modelagem baseados na solução integral da equação da onda (operadores do tipo Kirchhoff).

O método dos mínimos quadrados permite que se calcule os parâmetros que descrevem as observações de forma que o somatório dos erros quadrados seja mínimo (Porsani, 2008). Este erro é a diferença entre o dado calculado e o dado observado. No nosso caso, o dado observado é uma seção sísmica empilhada em tempo, ou seja, seção de afastamento nulo. O dado calculado é obtido através da demigração da seção migrada. Isto é, um procedimento de modelagem aplicado ao modelo de refletividade obtido através da seção migrada. Por sua vez, a seção migrada é obtida através da aplicação do operador de migração Kirchhoff no dado observado. Teoricamente, espera-se que a imagem demigrada (dado calculado) fosse exatamente igual ao dado observado, porém, devido às aproximações intrínsecas ao método de migração (operador de migração é o adjunto, e não o inverso, do operador de modelagem). Portanto, a seção migrada é uma versão filtrada da seção refletividade verdadeira pela matriz Hessiana. Assim, as seções em tempo calculada e observada podem ser usadas, através de um processo de otimização, para que se obtenha uma imagem sísmica de melhor qualidade.

Neste trabalho usamos o método de inversão através de um procedimento iterativo – o método gradiente (*steepest descent*), com vista a obter um melhor modelo em profundidade que se ajuste aos dados observados no sentido dos mínimos quadrados. Aplicando-se esse método de inversão iterativo, uma seção pós-empilhamento é utilizada para demonstrar a capacidade do método de obter uma imagem migrada de melhor qualidade e com redução dos artefatos de migração. Através dos testes realizados, foi possível observar uma imagem em profundidade de melhor qualidade do que a produzida pela migração Kirchhoff convencional.

Método

Assumindo que o operador linear de modelagem L pode ser representado por (Nemeth et al, 1999):

$$\mathbf{d} = \mathbf{L}\mathbf{m} \quad (1)$$

em que \mathbf{d} é o dado modelado e \mathbf{m} é modelo de refletividade. O dado observado \mathbf{d}_0 é descrito por $\mathbf{d}_0 = \mathbf{L}_0\mathbf{m}_0$ e \mathbf{m}_0 é a refletividade verdadeira. Também assume-se que $\mathbf{L} = \mathbf{L}_0$.

Na migração sísmica, usa-se a transposta do operador de modelagem na equação (1) para obter:

$$\mathbf{m}_{mig} = \mathbf{L}^T \mathbf{d} \quad (2)$$

e \mathbf{m}_{mig} é a seção migrada. Substituindo-se a equação (1) na equação (2) resulta em:

$$\mathbf{m}_{mig} = \mathbf{L}^T \mathbf{L} \mathbf{m}. \quad (3)$$

A matriz $\mathbf{L}^T \mathbf{L}$ é a Hessiana e define \mathbf{m}_{mig} como uma versão filtrada de \mathbf{m} por $\mathbf{L}^T \mathbf{L}$. Assim, a migração sísmica irá corretamente reconstituir a refletividade (\mathbf{m}), se $\mathbf{L}^T \mathbf{L}$ for uma matriz identidade. Em muitos casos $\mathbf{L}^T \mathbf{L}$ não é uma matriz identidade (Nemeth et al., 1999).

Portanto, o operador de migração sísmica pode ser considerado como o adjunto do operador de modelagem sísmica (Claerbout, 1992) como usado nos processos de inversão (Tarantola, 1984, 1987). Entretanto, o operador adjunto é uma boa aproximação para a inversa do operador de modelagem, mas ele não é a sua inversa exata.

Porém, a migração sísmica pode ser implementada para tentar aproximar o operador inverso exato. Para isso, podemos nos apropriar do método dos mínimos quadrados e resolver o problema através de um método iterativo. No nosso trabalho, usamos o método gradiente (*steepest descent*). Podemos obter a solução, minimizando a função objetivo $O(\mathbf{m})$, que é definida como os mínimos quadrados da diferença entre o dado modelado e o dado observado, ambos no domínio do tempo, que é dada por

$$O(\mathbf{m}) = \|\mathbf{L}\mathbf{m} - \mathbf{d}_o\| \quad (4)$$

O esquema numérico abaixo, mostra o cálculo da solução MMQ:

$$\mathbf{g}^k = \mathbf{L}^T [\mathbf{L}\mathbf{m} - \mathbf{d}_o] \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{(\mathbf{g}^{(k)})^T \mathbf{g}^k}{(\mathbf{L}\mathbf{g}^{(k)})^T \mathbf{L}\mathbf{g}^k} \quad (6)$$

$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k - \alpha \mathbf{g}^k \quad (7)$$

A equação (5) representa o resíduo migrado da função objetivo $O(\mathbf{m})$, associado ao modelo \mathbf{m} . Este vetor de resíduos está na mesma direção do vetor gradiente no ponto \mathbf{m} , porém em sentido oposto (Porsani, 2008). O vetor gradiente é representado por \mathbf{g}^k , matematicamente, este vetor aponta na direção de máxima inclinação. O parâmetro α representa o tamanho do passo a cada iteração feita na otimização, k é o número da iteração e \mathbf{L}^T é o operador de migração. A equação (7) é resultado da migração da imagem otimizada para cada iteração.

Para inverter e obter uma solução do tipo MQ para a migração de dados sísmicos, que passamos a chamar de MMQ, utilizamos o método iterativo gradiente, no qual a cada iteração realizada aproxima-se cada vez mais do erro mínimo. A partir da diferença entre as seções sísmicas calculada e observada, obtemos o erro, que é aplicado a ele o operador de migração \mathbf{L}^T , resultando no vetor gradiente, que será usado para a estimativa

do modelo migrado. Precisamos também calcular o parâmetro α , que corresponde ao passo que é realizado a cada iteração do vetor gradiente.

Além disso, os valores das amplitudes do dado observado e o dado calculado, ambos no domínio do tempo diferiam bastante. Então, foi necessário efetuar a normalização das amplitudes de ambos os dados. Com esse procedimento, conseguimos melhorar a convergência do erro e obter uma imagem migrada de melhor qualidade e com menos artefatos de migração.

Procedimento para obter a migração pós-empilhamento

Para realizar a migração Kirchhoff necessita-se, além do dado observado (seção em tempo), também do campo de velocidade, que é conhecido, ou seja, dado de entrada, para poder calcular as tabelas de tempo. Primeiro é calculado as tabelas de tempo e depois efetuada a migração da seção zero-offset.

A Figura 1 é o dado observado, seção de afastamento nulo, modelado a partir do modelo de velocidades do modelo SEG-EAGE. O modelo SEG-EAGE é uma estrutura complexa com um corpo de sal.

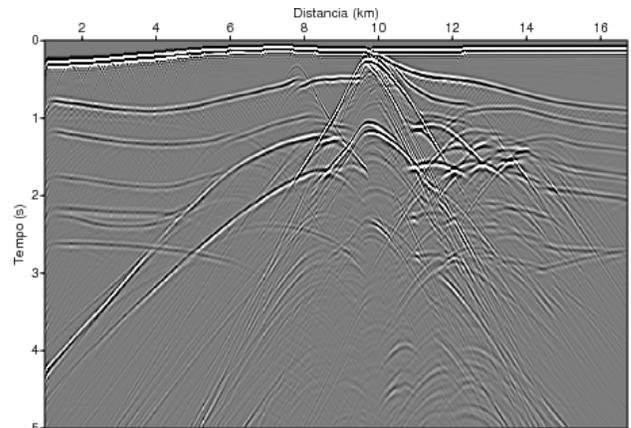


Figura 1 : Seção de afastamento nulo do modelo SEG-EAGE.

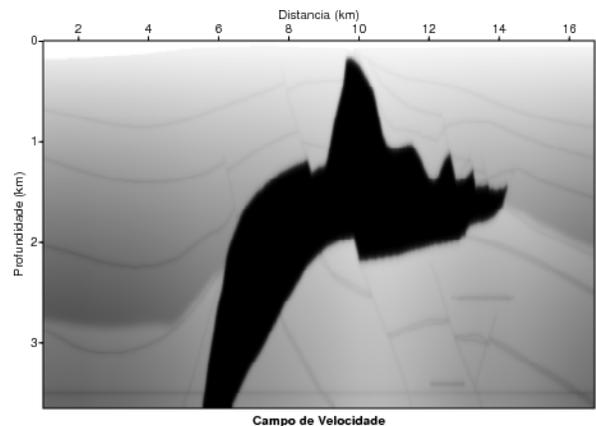


Figura 2 - Campo de velocidade do modelo SEG-EAGE que simula um corpo de sal com vários refletores e falhamentos.

Na Figura 2 temos uma versão suavizada do campo de velocidade do modelo SEG-EAGE. Esse modelo de velocidade será usado, tanto na migração como na modelagem dos dados. Inicialmente, calcula-se o tempo de chegada, através de um programa de traçamento de raios. Esse programa fornece as tabelas de tempos de chegada de todas as fontes e receptores. Em seguida, usando-se o método de migração Kirchhoff, faz-se a migração que irá resultar na seção migrada em profundidade. Para essas etapas foram utilizados os programas de traçamento de raios e a migração Kirchhoff do pacote Seismic Unix (SU/CWP) da Colorado School of Mines. Representado no fluxograma a seguir (Figura 3), estão os principais passos e parâmetros para a migração Kirchhoff.

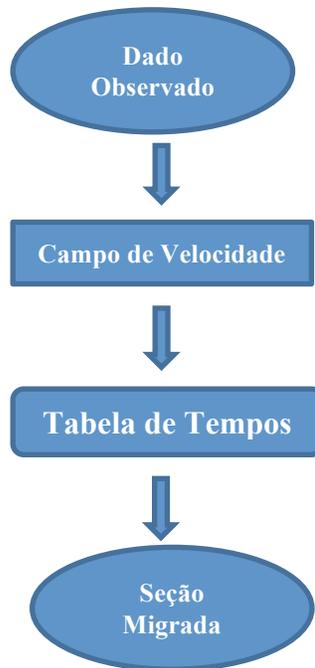


Figura 3 : Fluxograma do método de migração Kirchhoff

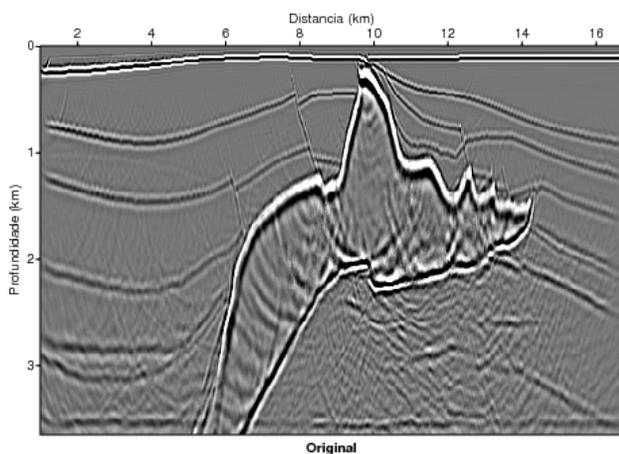


Figura 4: Resultado da migração Kirchhoff da seção de afastamento nulo do modelo SEG-EAGE (Figura 1), com o campo de velocidade mostrado na Figura 2.

O método de migração usando mínimos quadrados (MMQ), inicia-se quando obtemos a primeira seção migrada em profundidade (Figura 4). Em seguida é preciso modelar (demigrar) esta seção, usando-a como modelo de refletividade, como descrito pela equação (1), ou seja, o operador de modelagem transformará essa seção migrada num dado sísmico em tempo (dado calculado). O resíduo (diferença entre o dado calculado e o dado observado) é então migrado, dando origem ao vetor gradiente g (equação 5). Este vetor é demigrado para que seja feito o cálculo do passo α (equação 6), capaz de produzir um novo modelo (equação 7) cujo valor da função objetivo seja menor que a iteração anterior. O processo é repetido durante k iterações, até que se atinja um critério de parada. Desta forma, espera-se obter uma seção migrada (refletividade) de melhor qualidade do que a migração convencional e com menos artefatos de migração.

A seguir, descrevemos os principais passos usados na MMQ usando operadores do tipo Kirchhoff:

- 1 – Normalizar os dados observados;
2. Migrar os dados observados, usando o campo de velocidade mostrado na Figura 2;
- 2 – Modelagem (demigração) dos dados usando a seção migrada como o modelo de refletividade;
- 3 - Normalizar os dados calculados (seção demigrada);
- 4 - Iniciar o Loop;
- 5 - Calcular a diferença entre a seção demigrada e os dados observados;
- 6 – Migrar o dado resultante da diferença dos dados - calcular o vetor gradiente;
- 7 - Demigrar a refletividade obtida a partir da migração da diferença dos dados;
- 8 - Calcular o tamanho do passo otimizado (α);
- 9 - Atualizar o modelo de refletividade (seção migrada)
- 10 – Terminar se o erro for mínimo ou atingir o número de iterações.

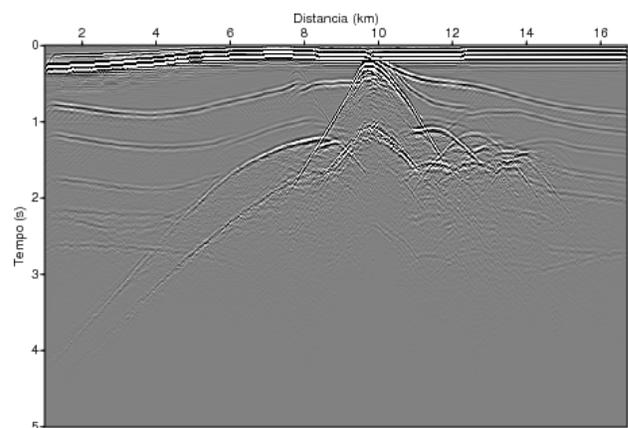


Figura 5: Seção de afastamento nulo do modelo SEG-EAGE obtida através da demigração do modelo refletividade – resultado obtido na 1ª iteração do processo de inversão.

A Figura 5 mostra a seção de afastamento nulo obtida a partir do processo de demigração usando o resultado da migração

Kirchhoff (Figura 4), como refletividade, e as tabelas de tempos geradas a partir do modelo de velocidade mostrado na Figura 2. Assim, obtemos uma seção em tempo que tem muitos dos eventos presentes no dado observado – seção de afastamento nulo mostrada na Figura 1. Porém, devido as peculiaridades do operador de migração, L^T , e de demigração, L , existem muitas diferenças entre o dado observado e o dado calculado. A partir das diferenças entre essas duas seções em tempo calculamos o vetor gradiente e atualizamos o resultado da migração. O processo é repetido até se obter um erro mínimo entre as seções observada e calculada, ou se atingir o número máximo de iterações.

Resultados

Os resultados foram obtidos usando o método de migração Kirchhoff pós-empilhamento em profundidade em um dado 2-D sintético, modelo SEG-EAGE, seção de afastamento nulo mostrado na Figura 1.

Para efeito de comparação e assim avaliar a qualidade dos resultados, comparamos o resultado da migração convencional Kirchhoff (Figura 4) com as imagens otimizadas usando o MMQ. Obtemos imagens otimizadas com 3, 10 e 15 iterações. Todas essas imagens migradas e demigradas pelo operador Kirchhoff foram obtidas usando o programa “sukdmig2d” para migrar e “sukdsyn2d” para demigrar. Ambos pertencem ao pacote de processamento sísmico SU (Seismic Unix) da Colorado School of Mines. Estes programas usam operadores do tipo Kirchhoff, com as tabelas de tempo obtidas usando-se traçamento de raios para a migração e a modelagem dos dados.

Os algoritmos utilizados foram implementados em código SHELL, empregando recursos computacionais do CPGG/INCT-GP/UFBA. Para gerar e exibir os dados foram usadas rotinas gráficas do pacote de processamento sísmico SU. Os resultados da migração Kirchhoff otimizada, através do método dos mínimos quadrados, são mostrados nas figuras 6(b), 6(c) e 6(d).

As amplitudes dos refletores, as laterais do domo de sal, assim como o contorno do mesmo foram melhor imageadas, inclusive o flanco do lado esquerdo do domo de sal. Este flanco por ser um refletor bastante íngreme não aparecia totalmente reconstruído, mas com a otimização MMQ obtivemos uma melhor continuidade desse refletor (Figura 7).

Quanto à parte abaixo do domo de sal que não apresenta os refletores bem localizados, creditamos isso ao método de cálculo dos tempos de trânsito, que possivelmente não forneceu os tempos corretos para o imageamento dessa região.

Para podermos ter uma maior confiança no funcionamento do método aplicado, analisamos o erro entre o dado calculado e o dado observado e verificamos um decrescimento do módulo ao quadrado do erro, uma vez que satisfaz a teoria do MMQ, no qual usamos o gradiente a cada iteração para calcular o erro mínimo. O gráfico mostrado na Figura 8 corresponde a variação da norma ao quadrado do erro com o número de iterações feitas, como também, resume de forma clara a convergência deste resíduo a cada iteração. Em algumas situações faz-se necessário usar um coeficiente de amortecimento, adicionado à função objetivo (equação 4). O principal propósito desta técnica é estabilizar a convergência do processo de inversão.

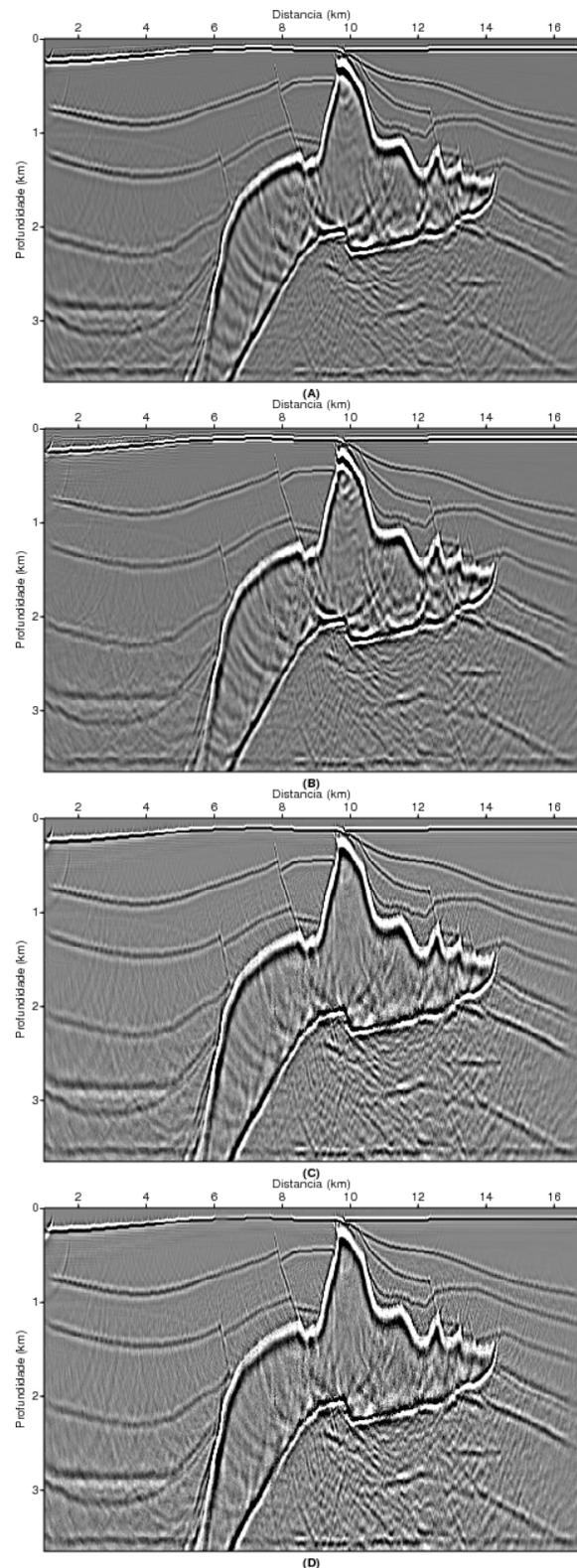


Figura 6: Modelos SEG-EAGE após migração Kirchhoff otimizado por MMQ: (a) migração original, (b) migração otimizada com 3 iterações, (c) migração otimizada com 10 iterações e (d) migração otimizada com 15 iterações.

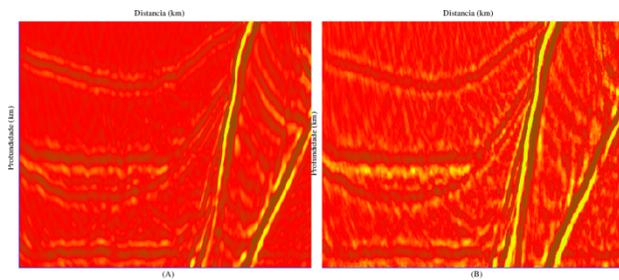


Figura 7: Flanco original 7(a), flanco otimizado 7(b).

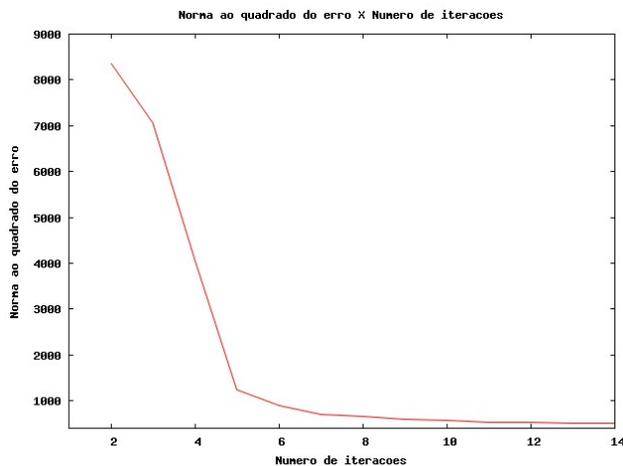


Figura 8: Gráfico da norma ao quadrado do resíduo versus o número de iterações.

Conclusão

Como verificamos anteriormente, os resultados apresentados pela migração Kirchhoff pós-empilhamento em profundidade otimizada, através do método dos mínimos quadrados, de uma forma geral, produziram imagens de melhor qualidade comparada ao resultado apresentado pela migração Kirchhoff convencional. Assim, conseguimos atestar a capacidade desse método em produzir seções migradas com melhor resolução dos refletores abaixo do corpo de sal e uma imagem final com uma melhor compensação de iluminação.

Dessa forma, ficou bastante visível a eficiência do método na seção migrada otimizada com 15 iterações (Figura 8), onde o método conseguiu uma recuperação muito boa na continuidade do refletor do lado esquerdo do flanco do domo de sal. Além disso, houve um fortalecimento do contorno do sal e um aumento da amplitude de todos os refletores. Entretanto, nota-se também um aumento significativo dos artefatos de migração nessa região. Podemos creditar isso ao fato da migração Kirchhoff não conseguir imagear com precisão os eventos abaixo do corpo salino, devido aos erros nos cálculos dos tempos de trânsito em razão do forte contraste de velocidade.

Também pretendemos, em futuros trabalhos, estender esse método de otimização, usando operadores de migração mais eficientes, e aplicá-lo em dados antes do empilhamento.

Espera-se, desta forma, que os operadores, baseados na solução da equação completa da onda, possam apresentar um melhor imageamento de estruturas complexas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CPGG/UFBA/INCT-GP, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Peterson Nogueira Santos agradece ao CNPq pelo suporte através da bolsa de pesquisa.

Referências

- Celso Alves, M.N., 2004, Migração pré-empilhamento em profundidade utilizando ondas planas: Tese de doutorado, 1, 23-64.
- Claerbout, J. F., 1992, Earth soundings analysis: Processing versus inversion: Blackwell Scientific Publications, Inc.
- Nemeth, T., 1999, Least-squares migration of incomplete reflection data: *Geophysics*, 64, 208-221.
- Porsani, M.J., 2008, O método dos mínimos quadrados: Notas de aulas da disciplina processamento de dados em geofísica.
- Porsani, M.J., 2008, Uma formulação de otimização para os algoritmos gradiente e gradiente conjugado pré-condicionados: Notas de aulas da disciplina processamento de dados em geofísica.
- S. Dong, J. Cai, M. Guo, S. Suh, Z. Zhang, B. Wang e Z. Li., 2012, Least-square reverse time migration: towards true amplitude imaging and improving the resolution: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Schuster, G.T., 1993, Least-squares crosswell migration: 63th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract.
- Tarantola, A., 1984, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: *Geophysics*, 49, 1259-1266.
- Wei Dai, Schuster, G.T., 2012, Plane-Wave Least-square reverse time migration: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Yilmaz, O. (2001) *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*, nº 10 In *Investigations in Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists.